بِسمِ اللهِ الرَّحمنِ الرَّحیم

اَللّهُمَّ صَلِّ عَلی مُحَمَّدٍ وَ آلِ مُحَمَّدٍ وَ عَجِّلْ فَرَجَهُمْ

فیزیک (۳)

رشتهٔ علوم تجربی

پایهٔ دوازدهم

دورهٔ دوم متوسطه

وزارت آموزش و پرورش
سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی

نام کتاب: فیزیک (۳) ـ پایهٔ دوازدهم دورهٔ دوم متوسطه ـ ۱۱۲۲۴۴
پدیدآورنده: سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی
مدیریت برنامه‌ریزی درسی و تألیف: دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطه نظری
شناسه افزوده برنامه‌ریزی و تألیف: احمد احمدی، روح‌الله خلیلی‌بروجنی، محمدرضا خوش‌بین‌خوش‌نظر، محمدرضا شریف‌زاده اکباتانی، سید هدایت سجادی، مجید عتیقی، سیروان مردوخی و علیرضا نیکنام (اعضای شورای برنامه‌ریزی و گروه تألیف) ـ سعید فرمانی (ویراستار ادبی)
مدیریت آماده‌سازی هنری: اداره کلّ نظارت بر نشر و توزیع مواد آموزشی
شناسه افزوده آماده‌سازی: احمدرضا امینی (مدیر امور فنی و چاپ) ـ جواد صفری (مدیر هنری) ـ محمّد مهدی ذبیحی‌فرد (طراح جلد) ـ راحله زادفتح‌اله (صفحه‌آرا) ـ فاطمه رئیسیان فیروزآباد (رسام) ـ سیّده فاطمه طباطبایی، سیف‌الله بیک‌محمددلیوند، حسین چراغی، سپیده ملک‌ایزدی، ناهید خیام‌باشی (امور آماده‌سازی)
نشانی سازمان: تهران: خیابان ایرانشهر شمالی ـ ساختمان شمارهٔ ۴ آموزش و پرورش (شهید موسوی)
تلفن: ۹ـ۸۸۸۳۱۱۶۱، دورنگار: ۸۸۳۰۹۲۶۶، کدپستی: ۱۵۸۴۷۴۷۳۵۹
وبگاه: www.chap.sch.ir و www.irtextbook.ir
ناشر: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران: تهران ـ کیلومتر ۱۷ جادهٔ مخصوص کرج ـ خیابان ۶۱ (داروپخش)
تلفن: ۵ـ۴۴۹۸۵۱۶۱، دورنگار: ۴۴۹۸۵۱۶۰، صندوق پستی: ۱۳۹ـ۳۷۵۱۵
چاپخانه: شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران «سهامی خاص»
سال انتشار و نوبت چاپ: چاپ چهارم ۱۴۰۰

شابک ۶ـ۳۱۳۹ـ۰۵ـ۹۶۴ـ۹۷۸
ISBN: 978-964-05-3139-6

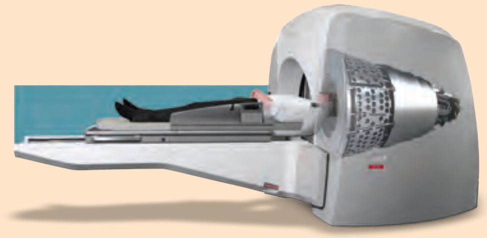


جوان‌ها قدر جوانی‌شان
را بدانند و آن را در علم و
تقوا و سازندگی خودشان
صرف کنند که اشخاصی
امین و صالح بشوند.
مملکت ما با اشخاص امین
می‌تواند مستقل باشد.

امام خمینی «قُدِّسَ سِرُّهُ»

فهرست

۴ آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای ۹۵



سخنی با دانش‌آموزان عزیز و همکاران محترم

کتاب فیزیک ۳ که برای پایهٔ دوازدهم دورهٔ نظری و برای رشتهٔ علوم تجربی تألیف شده است، در راستای تغییر برنامهٔ درسی آموزش علوم تجربی در سال‌های پیشین تدوین و ساماندهی شده است. برای برقراری ارتباط مؤثرتر با برنامهٔ درسی این کتاب و تحقق اهداف آن لازم است که با اهداف، شایستگی‌ها، رویکردها، راهبردهای یاددهی ـ یادگیری، شیوه‌های ارزشیابی و... آشنا شویم که در ادامه به معرفی مختصر آنها پرداخته می‌شود.

۱ــ شایستگی‌ها و اهداف

اهداف کلی در تدوین این کتاب به‌گونه‌ای است که دانش‌آموز بتواند :

الف) نظام‌مندی طبیعت را براساس درک و تحلیل مفاهیم، الگوها و روابط بین پدیده‌های طبیعی کشف و گزارش کند.

ب) با درک ماهیت، روش و فرایند علم تجربی، امکان به‌کارگیری علم و روش علمی را در حل مسائل زندگی (حال و آینده) کسب نماید و در عین‌حال محدودیت‌های علوم تجربی را در حل این مسائل دریابد.

پ) با استفاده از منابع علمی معتبر و بهره‌گیری از علوم تجربی، ایده‌هایی مبتنی بر تجارب شخصی خود، برای مشارکت در فعالیت‌های علمی ارائه دهد و در این فعالیت‌ها با حفظ ارزش‌ها و اخلاق علمی مشارکت نماید.

۲ــ رویکرد

سعی شده است رویکرد سازماندهی محتوا در این کتاب، ارائه متن به روش فعال و درگیر کردن دانش‌آموز باشد. در این سازماندهی، اصالت با موقعیت‌ها و زمینه‌های کاربردی در زندگی است که می‌توان در آنها موضوع‌های مرتبط با فیزیک را آموزش داد و یادگیری را معنادارتر و جذاب‌تر کرد. به‌همین دلیل از تعداد زیادی پرسش، فعالیت، تمرین، آزمایش و ... استفاده شده است. همچنین سعی شده است محتوای کتاب تصویرمحور باشد و بر همین اساس تصویرها، نمودارها و شکل‌های گوناگونی برای تسهیل آموزش انتخاب شده است.

به‌طور کلی این کتاب مبتنی بر این آموزه بنیادین است که فیزیک علمی تجربی است و هیچ نظریه‌ای در آن نمی‌تواند به‌عنوان حقیقت پایانی و غایی مطرح شود. به‌عبارت دیگر، همواره این امکان وجود دارد که مشاهده‌ها و آزمایش‌های جدید ایجاب کنند که یک نظریهٔ فیزیکی بازنگری و حتی رد شود.

۳ــ مفاهیم اساسی

این کتاب شامل سه بخش اساسی مکانیک، موج و فیزیک جدید است. بخش مکانیک، از مباحث حرکت و دینامیک تشکیل شده است که دانش‌آموزان با مقدمات برخی از این مباحث در علوم نهم و فیزیک ۱ آشنا شده‌اند. ضمناً بخشی از مطالب ریاضی مرتبط در سال‌های قبل آموزش داده شده است و بخشی نیز در سال جاری آموزش داده خواهد شد. در این فصل‌ها از تجزیه نیروها و مشتق استفاده نمی‌شود و نیروها در یک راستا و عمود برهم مورد بررسی قرار می‌گیرند و در فصل حرکت نیز فقط حرکت در مسیر مستقیم بررسی می‌شود.

بخش موج، از مباحث حرکت نوسانی، امواج مکانیکی (شامل امواج فنر، صوتی و...) و امواج الکترومغناطیسی و نیز برهم‌کنش‌های امواج (شامل بازتاب و شکست) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دورهٔ اول متوسطه و بخشی نیز در شیمی سال دهم مطرح شده است.

بخش فیزیک جدید، از مباحث فیزیک اتمی (شامل اثر فوتوالکتریک و فوتون، طیف خطی، مدل‌های اتمی و لیزر) و فیزیک هسته‌ای (شامل ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی) تشکیل شده است. بخشی از دانش مورد نیاز اولیه این قسمت در علوم دورهٔ اول متوسطه و بخشی نیز در درس شیمی سال دهم، مطرح شده است.

۴ــ مهارت‌های اساسی

مهارت اساسی موردنظر در این کتاب، چگونگی به‌کارگیری روش علمی است. روش علمی خود دارای خرده مفاهیم و اجزایی چون مشاهده، اندازه‌گیری، طراحی و انجام آزمایش، مدل‌سازی، کنترل متغیر، محاسبه، مشاهده و مقایسه، تحلیل و نتیجه‌گیری، گزارش، قضاوت و حل مسئله است.

۵ــ راهبردهای یاددهی ــ یادگیری

راهبرد اصلی در آموزش محتوای کتاب‌های فیزیک دورهٔ متوسطه راهبرد اکتشافی و تعاملی است. برای این منظور از اجزای گوناگون، مانند «تصاویر و پرسش‌های درگیرکننده در ابتدای هر بخش، فعالیت‌های ذهنی و عملی، پرسش، تمرین، آزمایش، تاریخ علم، خوب است بدانید، تصویرهای آموزشی و...» در طراحی، تدوین و تألیف محتوا استفاده شده است. انتظار می‌رود موضوع‌های درسی در کلاس به‌گونه‌ای طرح شوند که اکثر دانش‌آموزان در فرایند آموزش و یادگیری درگیر شوند و مهارت‌های علمی و عملی آنها رشد یابد. انتظار می‌رود که دانش‌آموزان مهارت علمی در برخورد با یک پدیده و پیمودن مراحلی را که به شناسایی آن پدیده می‌انجامد، فراگیرند.

۶ــ شیوهٔ ارزشیابی

به فرایند جمع‌آوری اطلاعات از آموخته‌های دانش‌آموزان (دانش‌ها، مهارت‌ها، نگرش‌ها و به‌طور کلی شایستگی‌ها) و قضاوت در مورد آنها ارزشیابی می‌گویند. ارزشیابی دو گونه است؛ مستمر و پایانی. از آنجا که آزمون پایانی این کتاب به‌صورت امتحان نهایی برگزار می‌شود، ضروری است رویکرد جدید کتاب درسی در ارزشیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود متناسب با نوع ارزشیابی (مستمر و پایانی)، انتظارات عملکردی مورد توجه قرار گیرند. جدول زیر بخشی از این انتظارات را نشان می‌دهد.

ردیف	انتظارهای عملکردی
۱	طراحی آزمایش، تحلیل و تفسیر آزمایش
۲	اجرای آزمایش، ثبت داده‌ها، نتیجه‌گیری و ارائهٔ گزارش
۳	تجزیه و تحلیل داده‌ها، رسم نمودار، نتیجه‌گیری از داده‌ها، پیش‌بینی و...
۴	انجام تحقیق و جمع‌آوری اطلاعات (طراحی، اجرا، ثبت داده‌ها، تجزیه و تحلیل، ارائهٔ گزارش)
۵	مشارکت و تعامل در فرایند آموزش (انجام فعالیت‌های عملی و آزمایشگاهی، مشارکت در بحث‌های گروهی، کنجکاوی علمی و طرح پرسش‌های مفهومی)
۶	پاسخ به پرسش‌های مفهومی در حیطه‌های مختلف، دانش، کاربرد، استدلال و قضاوت
۷	توانایی حل مسئله و پرسش‌های محاسباتی
۸	حل مسائل در شرایط جدید (کاربرد و استدلال)

تجربه نشان می‌دهد که درک ایده‌های نهفته در بیشتر مفاهیم فیزیک و کاربرد آنها در زندگی برای اغلب دانش‌آموزان امکان‌پذیر است. آنچه در این‌راه در میزان موفقیت دانش‌آموزان مؤثر است، شیوه‌های آموزش ما در کلاس درس است. این شیوه‌ها می‌توانند درهای درک و فهم مفاهیم فیزیک را برای همهٔ دانش‌آموزان، بدون توجه به توانایی علمی آنان، باز کند. بنابراین، می‌توان گفت شیوهٔ آموزش کارآمد، کلید موفقیت هر برنامهٔ درسی است. انتظار می‌رود همکاران ارجمند با تکیه بر تجربهٔ خود و به‌کارگیری شیوه‌های آموزشی مؤثر، بستر مناسبی برای یادگیری و مشارکت دانش‌آموزان در فرایند آموزش و همچنین شوق انگیزتر شدن فضای کلاس فراهم کنند.

از همکاران و دبیران گرامی انتظار می‌رود که برنامه و محتوای کتاب درسی را ملاک آموزش و ارزشیابی قرار داده و به موارد زیر پیش از تدریس توجه فرمایند.

- محتوای حذف‌شده نسبت به کتاب‌های قبلی کدام است؟
- رویکرد جدید کتاب درخصوص سازماندهی محتوا و ترتیب و توالی مطالب چیست؟
- تا چه میزان می‌توان محتوای کتاب را بسط و گسترش داد؟
- محتوای اصلی و فرعی در هر فصل کدام موضوع‌ها هستند؟
- هر فصل را چگونه می‌توان به واحدهای یادگیری معینی تقسیم کرد و مطابق با زمان‌بندی پیش برد؟

در برنامهٔ جدید آموزش فیزیک به هر مبحث و موضوع تنها یک‌بار پرداخته شده است و حدّ نهایی آن براساس آنچه در کتاب درسی آمده، تعیین می‌شود. بدیهی است پرداختن به مطالب اضافی و خارج از برنامهٔ درسی فرصت تعمیق مفاهیم اصلی کتاب را از بین می‌برد.

گروه فیزیک لازم می‌داند از دبیرخانهٔ راهبردی فیزیک، اتحادیهٔ انجمن‌های علمی آموزشی معلمان فیزیک ایران و همکارانی که به‌طور مستقل در اعتبارسنجی این کتاب با ما همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی کند. همچنین این گروه از دریافت پیشنهادهای اصلاحی دبیران محترم، صاحب‌نظران و دانش‌آموزان عزیز همچون همیشه استقبال می‌کند.

http: //physics – dept.talif.sch.ir

گروه فیزیک دفتر تألیف کتاب‌های درسی عمومی و متوسطهٔ نظری

فصل ۱

حرکت بر خط راست



در چه صورت بردار شتاب دو خودرو که بر خط راست و در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کنند می‌تواند یکسان باشد؟

بخش‌ها

۱ــ۱ شناخت حرکت
۱ــ۲ حرکت با سرعت ثابت
۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت

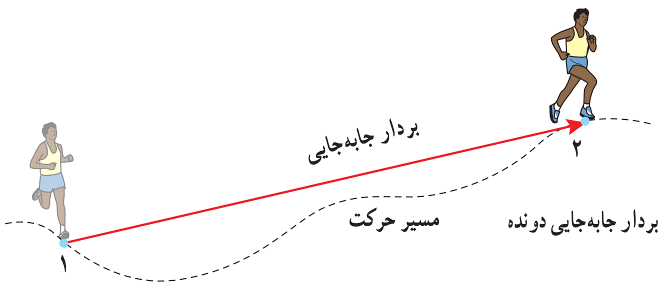
بررسی حرکت اجسام، همواره مورد توجه بشر بوده است. در فیزیک نیز، شناخت و توصیف حرکت اجسام، یکی از مباحث مهمی است که در هر کتاب درسی به آن پرداخته می‌شود و زمینه‌ساز درک بهتر مباحث دیگر فیزیک است. آشنایی با حرکت اجسام، که به آن حرکت‌شناسی یا سینماتیک نیز گفته می‌شود، در بیشتر شاخه‌های مهندسی اهمیت زیادی دارد. برای مثال، مدت زمان رسیدن تندی خودرو از صفر به $100 km/h$ یکی از معیارهای مقایسهٔ خودروهای امروزی در صنعت خودروسازی است. همچنین مهندسانی که به طراحی و ساخت باند پرواز فرودگاه‌ها می‌پردازند توجه دارند که هواپیماهای مختلف برای آنکه به تندی لازم برای برخاستن برسند، چه مسافتی را باید روی باند پرواز طی کنند. زمین‌شناسان نیز برای تعیین محل‌هایی که امکان وقوع زمین‌لرزه در آنها بیشتر است باید حرکت صفحه‌های زمین را بررسی کنند و از مفاهیم مرتبط با بحث حرکت‌شناسی استفاده کنند. افزون بر اینها پژوهشگران پزشکی برای یافتن رگ مسدود باید به نحوهٔ حرکت خون در رگ‌ها توجه کنند.

در این فصل ابتدا نگاهی دقیق‌تر خواهیم انداخت به آنچه در علوم نهم در خصوص حرکت آموختید. پس از آن، به ساده‌ترین نوع حرکت، یعنی حرکت جسم بر خط راست با سرعت ثابت، خواهیم پرداخت. پس از آن حرکت با شتاب ثابت بر خط راست را بررسی می‌کنیم.

۱ــ۱ شناخت حرکت

در علوم سال نهم با مفاهیم اولیهٔ حرکت آشنا شدید. در این بخش ضمن مرور این مفاهیم و کمیت‌های مرتبط با آنها، زمینهٔ لازم را برای شناخت و توصیف دقیق‌تر حرکت فراهم می‌کنیم.

مسافت و جابه‌جایی : شکل ۱ــ۱ مسیر حرکت دونده‌ای را از مکان ۱ تا مکان ۲ نشان می‌دهد. طول این مسیر، مسافت پیموده شده یا به‌اختصار مسافت نامیده می‌شود. همچنین پاره‌خط جهت‌داری که مکان آغازین حرکت را به مکان پایانی حرکت وصل می‌کند بردار جابه‌جایی نامیده می‌شود.

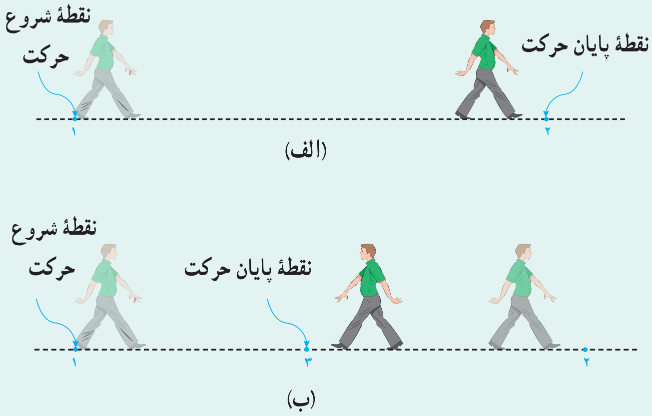


شکل ۱ــ۱ مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی دونده

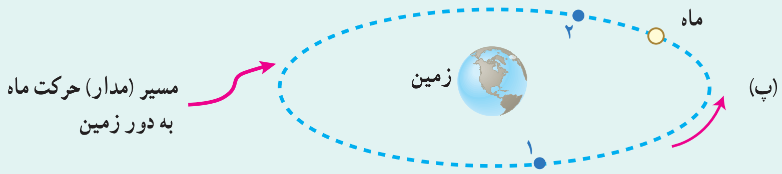
پرسش ۱ــ۱

۱ــ شکل الف شخصی را در حال پیاده‌روی در راستای خط راست و بدون تغییر جهت، از مکان ۱ به مکان ۲ نشان می‌دهد. مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی را با مسافت مقایسه کنید.

۲ــ شخص پس از رسیدن به مکان ۲، برمی‌گردد و روی همان مسیر به مکان ۳ می‌رود (شکل ب). مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی شخص را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.

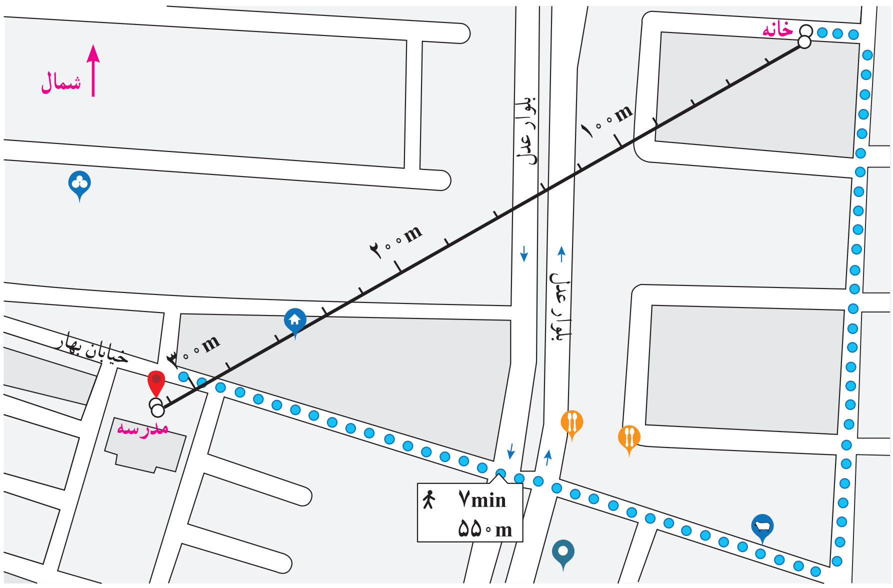


۳ــ شکل پ مسیر حرکت ماه به دور زمین را نشان می‌دهد. وقتی ماه در جهت نشان داده شده در شکل، از مکان ۱ به مکان ۲ می‌رود مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی آن را روی شکل مشخص و اندازهٔ بردار جابه‌جایی آن را با مسافت پیموده شده مقایسه کنید.



فعالیت ۱ــ۱

همانند شکل روبه‌رو و به کمک یک نرم‌افزار نقشه‌یاب، مکان خانه و مدرسه‌تان را مشخص کنید. سپس مسافت و اندازهٔ بردار جابه‌جایی خانه تا مدرسه را تعیین کنید.



تندی متوسط و سرعت متوسط : اگر متحرکی مانند دوندهٔ شکل ۱ــ۱ در مدت زمان Δt از مکان ۱ به مکان ۲ برود و مسافت و بردار جابه‌جایی بین این دو مکان را به ترتیب با l و $\vec{d}$ نشان دهیم، همان‌طور که در علوم سال نهم دیدید، تندی متوسط و سرعت متوسط دونده به‌صورت زیر تعریف می‌شوند[۱] :

$$s_{av}=\frac{l}{\Delta t} \qquad \text{(تندی متوسط)} \qquad (۱ــ۱)$$

$$\vec{v}_{av}=\frac{\vec{d}}{\Delta t} \qquad \text{(سرعت متوسط)} \qquad (۱ــ۲)$$

همان‌طور که دیده می‌شود تندی متوسط، کمیتی نرده‌ای و سرعت متوسط، کمیتی برداری[۲] است و یکای SI آنها، متر بر ثانیه (m/s) است که می‌توان آنها را برحسب یکاهای دلخواه دیگری مانند کیلومتر بر ساعت (km/h) نیز بیان کرد.

۱ــ شاخص پایین av در نمادهای تندی متوسط و سرعت متوسط از واژهٔ انگلیسی average به معنای متوسط گرفته شده است.

۲ــ آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبهٔ $\vec{d}$ و $\vec{v}_{av}$، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحهٔ xy یا فضای xyz می کند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

مثال ۱ــ۱

تندی متوسط و سرعت متوسط دانش‌آموز فعالیت ۱ــ۱ را پیدا کنید.

پاسخ : با توجه به داده‌های روی نقشه، اگر دانش‌آموز در مدت زمان $\Delta t = ۷/۰۰ \mathrm{min} = ۴۲۰ \mathrm{s}$ مسافت $l = ۵۵۰ \mathrm{m}$ را از خانه تا مدرسه پیموده باشد، با توجه به رابطهٔ ۱ــ۱ تندی متوسط وی برابر $s_{av} = ۵۵۰ \mathrm{m} / ۴۲۰ \mathrm{s} = ۱/۳۱ \mathrm{m/s}$ می‌شود و مفهوم فیزیکی آن این است که دانش‌آموز به‌طور متوسط در هر ثانیه ۱/۳۱m از طول مسیر را پیموده است. همچنین با توجه به نقشه، اندازهٔ بردار جابه‌جایی دانش‌آموز ۳۲۵ متر و جهت آن به طرف جنوب غربی است. در نتیجه با توجه به رابطهٔ ۱ــ۲ اندازهٔ سرعت متوسط وی برابر $v_{av} = ۳۲۵ \mathrm{m} / ۴۲۰ \mathrm{s} = ۰/۷۷۴ \mathrm{m/s}$ و جهت آن به طرف جنوب غربی است.

پرسش ۱ــ۲

در چه صورت اندازهٔ سرعت متوسط یک متحرک با تندی متوسط آن برابر است؟ برای پاسخ خود می‌توانید به شکل‌های پرسش ۱ــ۱ نیز توجه کنید.

اکنون سرعت متوسط را برای حالتی بررسی می‌کنیم که جسم بر خط راست حرکت می‌کند. به این منظور محوری مانند محور x را انتخاب و فرض می‌کنیم که جسم در راستای آن حرکت می‌کند. توجه کنید که در انتخاب محور (در اینجا محور x) مکان دلخواهی به عنوان مبدأ ($x=۰$) روی محور در نظر گرفته می‌شود. برداری که مبدأ محور را به مکان جسم در هر لحظه وصل می‌کند بردار مکان جسم در آن لحظه نامیده می‌شود.

شکل ۱ــ۲ الف و ب، بردار مکان شخصی را که در جهت محور x می‌دود در دو لحظهٔ متفاوت t_1 و t_2 نشان می‌دهد. بردار مکان دونده را در این دو لحظه، می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

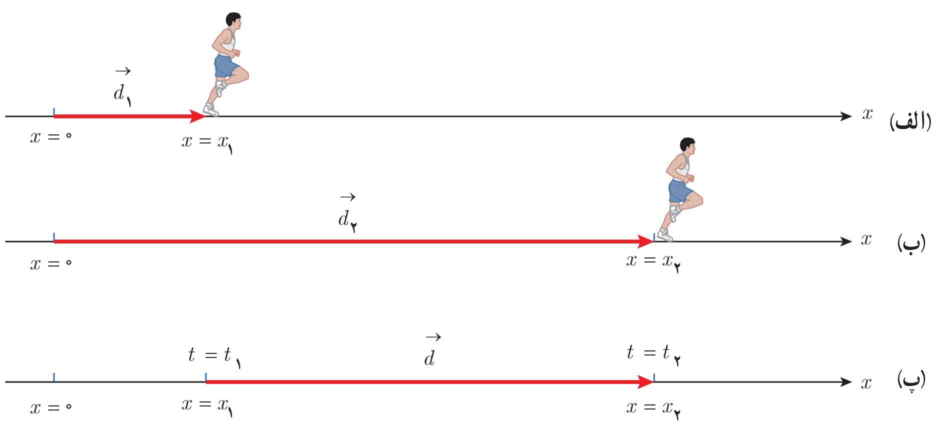
$$\vec{d}_1 = x_1 \vec{i} \quad \text{و} \quad \vec{d}_2 = x_2 \vec{i}$$

در این صورت و با توجه به شکل ۱ــ۲ پ، بردار جابه‌جایی دونده برابر است با

$$\vec{d} = \vec{d}_2 - \vec{d}_1 = x_2 \vec{i} - x_1 \vec{i} = (\Delta x) \vec{i}$$

به این ترتیب رابطهٔ ۱ــ۲ مربوط به سرعت متوسط دونده را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد :

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} \qquad \text{(سرعت متوسط در راستای محور } x) \qquad (۱\text{ــ}۳)$$



شکل ۱ــ۲ (الف) و (ب) بردار مکان دونده در دو لحظهٔ متفاوت و (پ) بردار جابه‌جایی آن

مثال ۱ـ۲

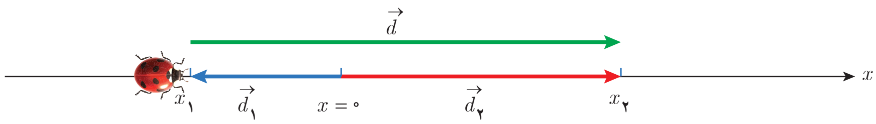
کفش‌دوزکی که در جهت محور x در حرکت است، در لحظه‌های t_1=۰s و t_2=۷۴s به ترتیب از مکان‌های x_1=−۲۸cm و x_2=۵۴cm می‌گذرد.

الف) بردارهای مکان در لحظه‌های t_1 و t_2 و بردار جابه‌جایی کفش‌دوزک در این بازهٔ زمانی را رسم کنید.

ب) سرعت متوسط کفش‌دوزک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.



پاسخ: الف)



ب) چون کفش‌دوزک در راستای خط راست حرکت می‌کند، سرعت متوسط آن برابر است با:

$$\vec{v}_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\vec{i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}\vec{i} = \frac{۵۴\text{cm} - (-۲۸\text{cm})}{۷۴\text{s} - ۰\text{s}}\vec{i} = (۱/۱\,\text{cm/s})\,\vec{i}$$

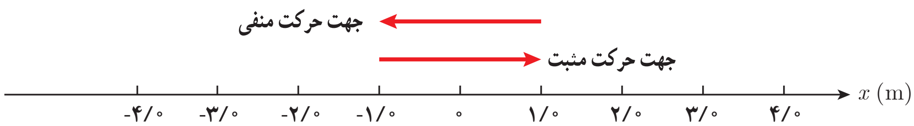
تمرین ۱ـ۱

جدول زیر را کامل کنید. فرض کنید هر چهار متحرک در مدت زمان ۴/۰s فاصلهٔ بین مکان آغازین و مکان پایانی را طی می‌کنند.

	مکان آغازین	مکان پایانی	بردار جابه‌جایی	سرعت متوسط	جهت حرکت
متحرک A	$(-۲/۰\,\text{m})\,\vec{i}$	$(۶/۴\,\text{m})\,\vec{i}$			
متحرک B		$(-۲/۵\,\text{m})\,\vec{i}$	$(-۵/۶\,\text{m})\,\vec{i}$		
متحرک C	$(۲/۰\,\text{m})\,\vec{i}$	$(۸/۶\,\text{m})\,\vec{i}$			
متحرک D	$(-۱/۴\,\text{m})\,\vec{i}$			$(۲/۴\,\text{m/s})\,\vec{i}$	

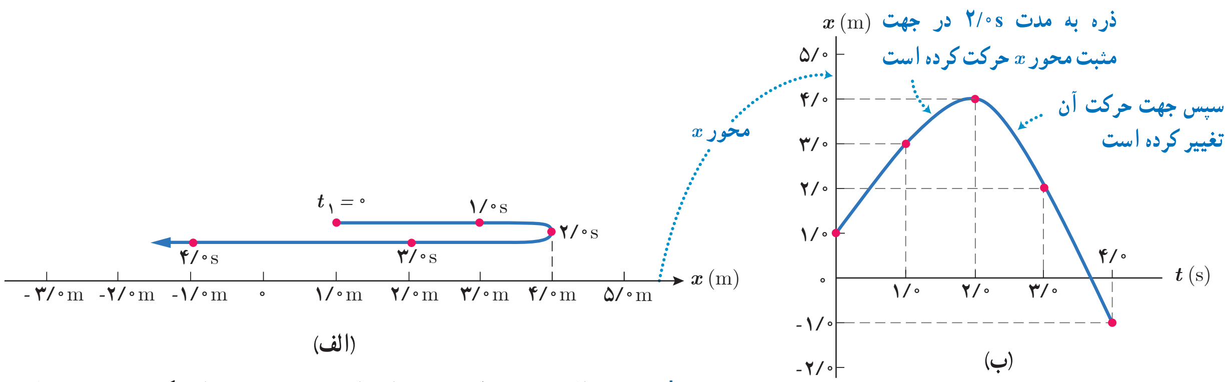
از آنجا که در ادامهٔ این فصل، تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، جابه‌جایی متحرک را به‌جای بردار $\vec{d}$ به‌صورت Δx و سرعت متوسط را به‌جای بردار $\vec{v}_{av}$ به‌صورت رابطهٔ زیر در حل مسئله‌ها به کار می‌بریم. در این صورت علامت جبری Δx و v_{av} جهت جابه‌جایی را نشان می‌دهند. اگر متحرک در جهت محور x حرکت کند جابه‌جایی و سرعت متوسط آن مثبت و اگر متحرک در خلاف جهت محور x حرکت کند، جابه‌جایی و سرعت متوسط آن منفی خواهد بود (شکل ۱ـ۳).

(رابطهٔ سرعت متوسط برای حرکت در راستای محور x) $$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (۱ـ۴)$$



شکل ۱ـ۳ مکانی که روی یک محور تعیین می‌شود برحسب یکای طول (در اینجا متر) نشانه گذاری می‌شود و در دو جهت تا بی‌نهایت ادامه دارد. نام محور، در اینجا x، در قسمت مثبت نوشته می‌شود.

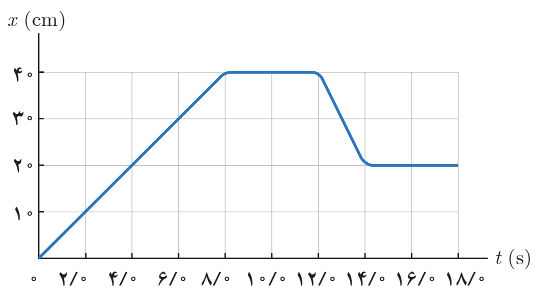
برای توصیف حرکت یک جسم می‌توان از نمودار مکان ــ زمان، که مکان جسم را در هر لحظه نشان می‌دهد، استفاده کرد. برای رسم این نمودار، زمان را روی محور افقی و مکان را روی محور قائم در نظر می‌گیریم. برای مثال، به حرکت ذره‌ای که در شکل ۱ــ۴ الف نشان داده شده است، توجه کنید. این ذره در لحظهٔ t_1=۰s در مکان x_1=۱/۰m، در لحظهٔ t_2=۱/۰s در مکان x_2=۳/۰m قرار دارد و به همین ترتیب در لحظه‌های دیگر در مکان‌های دیگر. اگر بخواهیم نمودار مکان ــ زمان حرکت این ذره را رسم کنیم، ابتدا هر یک از محورهای مکان و زمان را با مقیاسی مناسب مدرّج می‌کنیم. سپس نقاطی از نمودار را که مربوط به هر یک از زمان‌ها و مکان‌های داده شده است، در صفحهٔ $x-t$ مشخص می‌کنیم و با وصل کردن این نقاط به هم، به وسیلهٔ یک منحنی (خم) هموار، نمودار مکان ــ زمان را همانند شکل ۱ــ۴ــ ب رسم می‌کنیم.



شکل ۱ــ۴ الف) مسیر حرکت ذره در امتداد محور x. ب) نمودار مکان ــ زمان متحرک

مثال ۱ــ۳

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان مورچه‌ای را نشان می‌دهد که در راستای محور x در حرکت است.



الف) در کدام بازهٔ زمانی مورچه در جهت محور x حرکت می‌کند؟

ب) در کدام بازهٔ زمانی مورچه در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در کدام بازه‌های زمانی مورچه ایستاده است؟

ت) در کدام لحظه‌هایی فاصلهٔ مورچه از مبدأ ۳۰cm است؟

ث) در کدام بازهٔ زمانی فاصلهٔ مورچه از مبدأ محور بیشترین مقدار است؟

ج) جابه‌جایی و سرعت متوسط مورچه را در بازهٔ زمانی ۴/۰s تا ۸/۰s پیدا کنید.

پاسخ : الف) در بازهٔ زمانی t = ۰/۰s تا t = ۸/۰s، زیرا در این بازه، x همواره در حال افزایش است.

ب) در بازهٔ زمانی t = ۱۲/۰s تا t = ۱۴/۰s، زیرا در این بازه، x همواره در حال کاهش است.

پ) در بازه‌های زمانی t = ۸/۰s تا t = ۱۲/۰s و t = ۱۴/۰s تا t = ۱۸/۰s

ت) در لحظه‌های t = ۶/۰s و t = ۱۳/۰s

ث) در بازهٔ زمانی t = ۸/۰s تا t = ۱۲/۰s

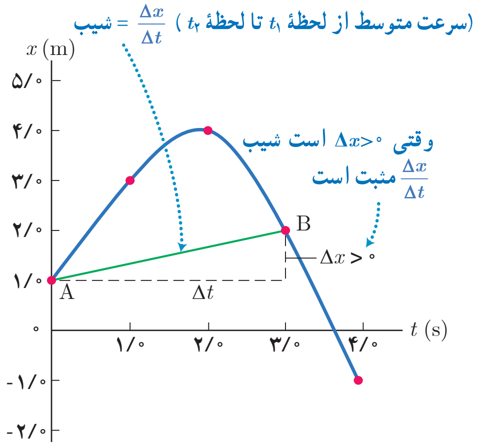
ج)

$$\Delta x = x_2 - x_1 = ۴۰\,cm - ۲۰\,cm = ۲۰\,cm$$

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲۰\,cm}{۸/۰\,s - ۴/۰\,s} = ۵/۰\,cm/s$$

علامت مثبت نشان می‌دهد که مورچه در جهت مثبت محور x جابه‌جا شده است.

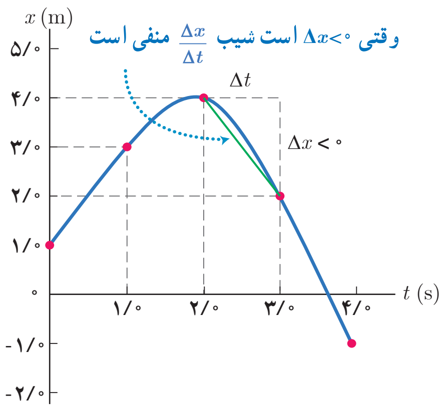
تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان ــ زمان : دوباره به نمودار شکل ۱ــ۴ که پاره‌خط بین دو نقطهٔ دلخواه آن مطابق شکل ۱ــ۵ رسم شده است توجه کنید. همان‌طور که از درس ریاضی می‌دانید نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ برابر شیب پاره‌خطی است که دو نقطهٔ A و B را به هم وصل می‌کند. از سوی دیگر با توجه به رابطهٔ ۱ــ۴ می‌دانیم که این نسبت برابر سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی t_1 تا t_2 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره‌خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان ــ زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.



شکل ۱ــ۵ سرعت متوسط بین دو لحظهٔ $t_1=0$ و $t_2=3s$

مثال ۱ــ۴

با توجه به نمودار مکان ــ زمان شکل ۱ــ۴، سرعت متوسط ذره را در بازهٔ زمانی $t_1 = ۲/۰ s$ تا $t_2 = ۳/۰ s$ به‌دست آورید.



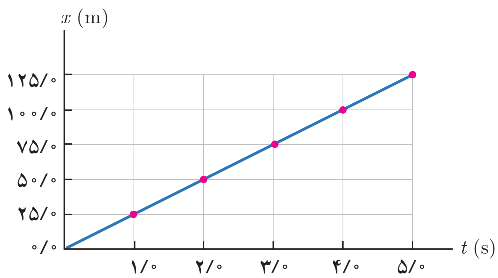
پاسخ : از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲/۰\,m - ۴/۰\,m}{۳/۰\,s - ۲/۰\,s} = -۲/۰\,m/s$$

علامت منفی v_{av} نشان می‌دهد که شیب خط واصل بین این دو نقطه از نمودار مکان ــ زمان، منفی است. توجه کنید که بدون محاسبهٔ v_{av} نیز، با توجه به فهم هندسی‌ای که از منفی بودن شیب خط واصل دو نقطهٔ نمودار داریم، می‌توانستیم به منفی بودن v_{av} پی ببریم.

مثال ۱ــ۵

نمودار مکان ــ زمان موتورسواری که بر خط راست حرکت می‌کند مطابق شکل روبه‌رو است. سرعت متوسط موتورسوار را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۱/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۱/۰s تا ۵/۰s محاسبه کنید. نتایج به‌دست آمده را با هم مقایسه و تفسیر کنید.



پاسخ : با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۴، سرعت متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

بازهٔ زمانی ۰/۰ s تا ۱/۰s

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۲۵/۰\,m - ۰/۰\,m}{۱/۰\,s - ۰/۰\,s} = ۲۵\,m/s$$

بازهٔ زمانی ۲/۰s تا ۴/۰s

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۱۰۰/۰\,m - ۵۰/۰\,m}{۴/۰\,s - ۲/۰\,s} = ۲۵\,m/s$$

بازهٔ زمانی ۱/۰s تا ۵/۰s

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{۱۲۵/۰\,m - ۲۵/۰\,m}{۵/۰\,s - ۱/۰\,s} = ۲۵\,m/s$$

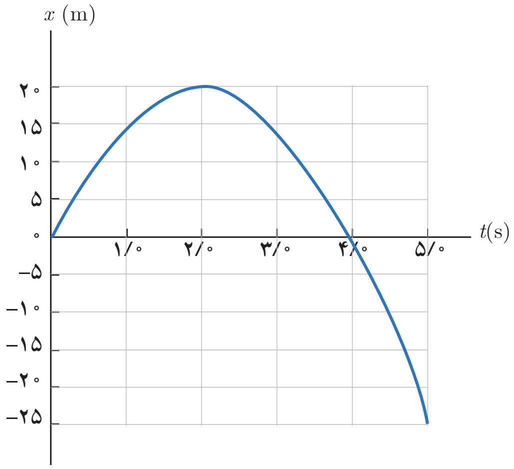
اگر در هر بازهٔ زمانی دلخواه دیگری نیز سرعت متوسط موتورسوار را حساب کنید، خواهید دید که همین مقدار برای آن به‌دست می‌آید. از آنجا که شیب نمودار مکان ــ زمان برای هر بازهٔ زمانی دلخواه برابر سرعت متوسط متحرک است، با توجه به ثابت بودن شیب نمودار مکان ــ زمان موتورسوار در طول حرکت، چنین انتظاری می‌رفت.

مثال ۱ــ۶

شکل روبه‌رو، نمودار مکان ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کند.

الف) با استفاده از داده‌های روی شکل، سرعت متوسط خودرو را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۰/۰s تا ۴/۰s، ۲/۰s تا ۴/۰s، ۲/۰s تا ۵/۰s، ۴/۰s تا ۵/۰s حساب کنید.

ب) در کدام یک از این بازه‌های زمانی، سرعت متوسط در جهت محور x و در کدام یک در خلاف جهت محور x است؟



پاسخ: الف) با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۳، سرعت متوسط خودرو برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با:

بازهٔ زمانی ۰/۰ s تا ۲/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۲۰\,m-۰m}{۲/۰s-۰/۰s}=۱۰\,m/s$$

بازهٔ زمانی ۰/۰ s تا ۴/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۰m-۰m}{۴/۰s-۰/۰s}=۰\,m/s$$

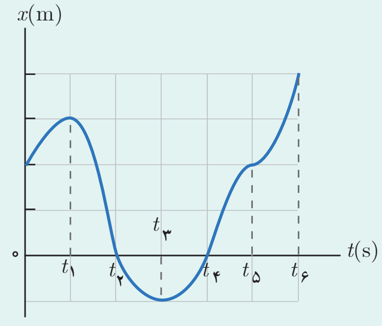
بازهٔ زمانی ۲/۰ s تا ۴/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{۰\,m-۲۰\,m}{۴/۰s-۲/۰s}=-۱۰\,m/s$$

بازهٔ زمانی ۲/۰ s تا ۵/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{-۲۵\,m-۲۰\,m}{۵/۰s-۲/۰s}=-۱۵\,m/s$$

بازهٔ زمانی ۴/۰ s تا ۵/۰s
$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{-۲۵\,m-۰m}{۵/۰s-۴/۰s}=-۲۵\,m/s$$

ب) در بازه‌های زمانی‌ای که سرعت متوسط خودرو مثبت است، سرعت متوسط خودرو در جهت محور x و در بازه‌های زمانی‌ای که سرعت متوسط منفی است، سرعت متوسط خودرو در خلاف جهت محور x است.

پرسش ۱ــ۳



با توجه به نمودار مکان ــ زمان شکل روبه‌رو به پرسش‌های زیر پاسخ دهید:

الف) متحرک چند بار از مبدأ مکان عبور می‌کند؟

ب) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال دور شدن از مبدأ است؟

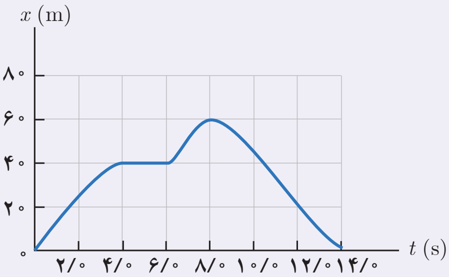
پ) در کدام بازه‌های زمانی متحرک در حال نزدیک شدن به مبدأ است؟

ت) جهت حرکت چند بار تغییر کرده است؟ در چه لحظه‌هایی؟

ث) جابه‌جایی کل در جهت محور x است یا خلاف آن؟

تمرین ۱ــ۲

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم در حال حرکت است.



الف) در کدام لحظه دوچرخه‌سوار بیشترین فاصله از مبدأ را دارد؟

ب) در کدام بازه‌های زمانی دوچرخه‌سوار در جهت محور x حرکت می‌کند؟

پ) در کدام بازهٔ زمانی دوچرخه‌سوار در خلاف جهت محور x حرکت می‌کند؟

ت) در کدام بازهٔ زمانی، دوچرخه‌سوار ساکن است؟

ث) تندی متوسط و سرعت متوسط دوچرخه‌سوار را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۴/۰s تا ۶/۰s، ۲/۰s تا ۵/۰s، ۸/۰s تا ۱۴/۰s، ۰/۰s تا ۱۴/۰s حساب کنید.

تندی لحظه‌ای و سرعت لحظه‌ای : تندی متحرک در هر لحظه از زمان را تندی لحظه‌ای می‌نامند. اگر هنگام گزارش تندی لحظه‌ای، به جهت حرکت متحرک نیز اشاره شود، در واقع سرعت لحظه‌ای ($\vec{v}$) آن را، که کمیتی برداری است بیان کرده‌ایم. برای مثال وقتی درون خودرویی به طرف شمال در حال حرکت باشید و در نقطه‌ای از مسیر، عقربهٔ تندی‌سنج خودروی شما روی ۱۰۰km/h باشد (شکل ۱ــ۶)، تندی لحظه‌ای خودرو برابر ۱۰۰km/h و سرعت لحظه‌ای آن ۱۰۰km/h به‌طرف شمال است. برای سادگی، بیشتر وقت‌ها سرعت لحظه‌ای و تندی لحظه‌ای را به‌ترتیب به‌صورت سرعت و تندی بیان می‌کنند. از آنجا که در ادامهٔ این فصل تنها حرکت اجسام بر خط راست بررسی می‌شود، سرعت لحظه‌ای متحرک را در حل مسئله‌ها به‌جای بردار $\vec{v}$ به‌صورت v به کار می‌بریم. هر گاه متحرک در جهت مثبت محور x حرکت کند v مثبت است و هر گاه در جهت منفی محور حرکت کند v منفی است.



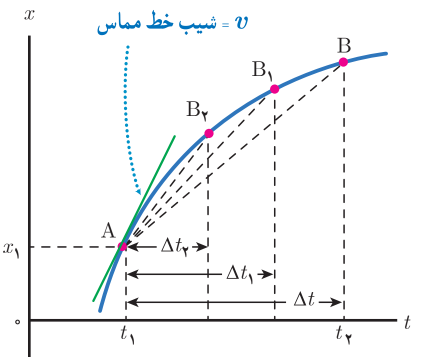
شکل ۱ــ۶ عقربهٔ تندی‌سنج، تندی لحظه‌ای خودرو را نشان می‌دهد و هیچ گونه اطلاعی در خصوص جهت حرکت خودرو به ما گزارش نمی‌کند.

توجه : واژهٔ لحظه در فیزیک با کاربرد محاوره‌ای آن در زندگی روزمره متفاوت است. همهٔ ما ممکن است عبارت «لطفاً کمی صبر کن. تنها یک لحظه طول می‌کشد» را در موارد زیادی به کار ببریم که منظور یک بازهٔ زمانی کوتاه، مثلاً چند ثانیه یا چند دقیقه است. ولی در فیزیک یک لحظه به هیچ وجه طول نمی‌کشد؛ لحظه به یک تک‌مقدار از زمان اشاره دارد.

پرسش ۱ــ۴

از روی نمودار مکان ــ زمان توضیح دهید در چه صورت سرعت لحظه‌ای متحرک همواره با سرعت متوسط آن برابر است.

تعیین سرعت لحظه‌ای به کمک نمودار مکان ــ زمان : پیش از این دیدیم که سرعت متوسط متحرک بین هر دو لحظهٔ دلخواه، برابر شیب خطی است که نمودار مکان ــ زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ــ۷ دیده می‌شود اگر Δt به‌تدریج کوچک و کوچک‌تر شود، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود؛ به‌طوری که اگر Δt به سمت صفر میل کند ($\Delta t \longrightarrow 0$) نقطهٔ B به نقطهٔ A بسیار نزدیک می‌شود و سرانجام خط واصل بین این دو نقطه به خط مماس بر نمودار در نقطهٔ A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر سرعت متحرک در لحظهٔ t_1 است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که : سرعت در هر لحظهٔ دلخواه t، برابر شیب خط مماس بر نمودار مکان ــ زمان در آن لحظه است.

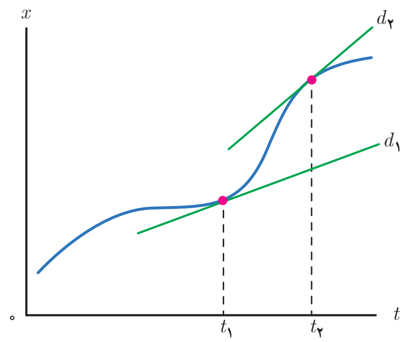


شکل ۱ــ۷ با کوچک شدن تدریجی Δt، نقطهٔ B به نقطهٔ A نزدیک می‌شود. در این صورت خط واصل بین این دو نقطه، در حالتی که بازهٔ زمانی Δt خیلی خیلی کوچک شود، به خط مماس بر منحنی در نقطهٔ A میل می‌کند. به این ترتیب شیب این خط، برابر با سرعت متحرک در لحظهٔ t_1 است.

مثال ۱ــ۷

شکل روبه‌رو نمودار مکان‌ــزمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. d_1 و d_2 خط‌های مماس بر منحنی را در دو لحظهٔ متفاوت نشان می‌دهند. در کدام لحظه سرعت متحرک بیشتر است؟

پاسخ : با توجه به شکل، شیب خط d_2 بیشتر از شیب خط d_1 است. بنابراین سرعت متحرک در لحظهٔ t_2 بیشتر از سرعت آن در لحظهٔ t_1 است $(v_2>v_1)$. توجه کنید که شیب هر دو خط مثبت است و بنابراین سرعت نیز در هر دو لحظه مثبت، یعنی در جهت محور x است.

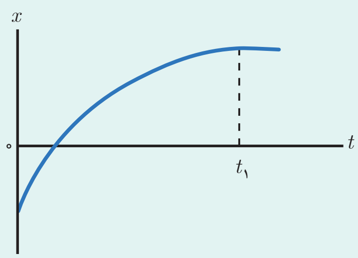


پرسش ۱ــ۵

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است.

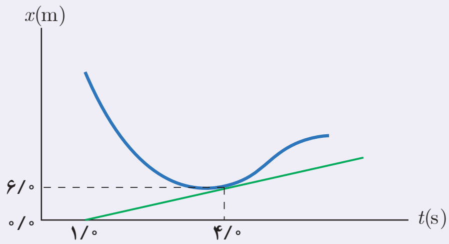
الف) از لحظهٔ صفر تا لحظهٔ t_1 سرعت متحرک رو به افزایش است یا کاهش؟

ب) اگر در لحظهٔ t_1 خط مماس بر منحنی موازی محور زمان باشد، سرعت متحرک در این لحظه چقدر است؟

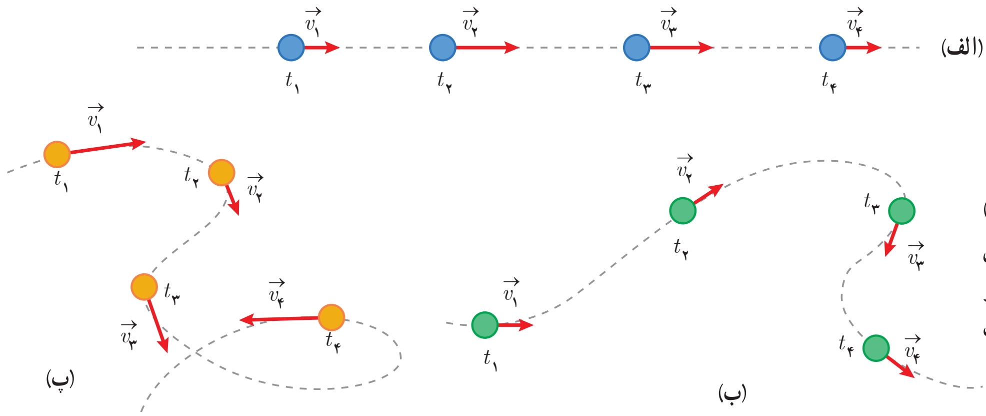


تمرین ۱ــ۳

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد. خط مماس بر منحنی در لحظهٔ $t=۴/۰\,s$، رسم شده است. سرعت متحرک را در این لحظه پیدا کنید.



شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای : در علوم سال نهم دیدید که هرگاه سرعت جسمی تغییر کند حرکت آن شتاب‌دار است. با توجه به اینکه بردار سرعت در هر نقطه از مسیر، بر مسیر حرکت مماس است[1] تغییر سرعت جسم در نقاط مختلف مسیر حرکت می‌تواند به دلیل تغییر در اندازهٔ بردار سرعت (تندی) جسم باشد (شکل ۱ــ۸ الف)، یا می‌تواند به‌دلیل تغییر در جهت بردار سرعت آن باشد (شکل ۱ــ۸ ب)، یا همچنین می‌تواند به‌دلیل تغییر در اندازه و جهت بردار سرعت متحرک باشد (شکل ۱ــ۸ پ).



شکل ۱ــ۸ وقتی سرعت جسمی (الف) به‌دلیل تغییر اندازهٔ آن، (ب) به‌دلیل تغییر جهت آن و (پ) به‌دلیل تغییر اندازه و جهت آن تغییر کند، حرکت جسم شتاب‌دار است.

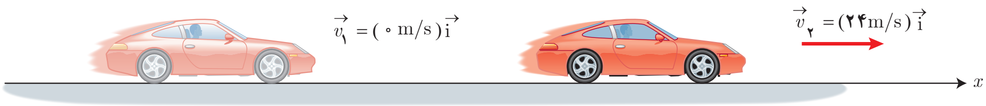
۱ــ توجه کنید که مماس بودن بردار سرعت بر مسیر حرکت متفاوت با برابری سرعت با شیب خط مماس بر نمودار مکان ــ زمان است که پیش از این دیدیم.

شتاب متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی دلخواه $t_۱$ تا $t_۲$ به‌صورت رابطهٔ ۱ــ۵ تعریف می‌شود که در آن $\vec{v}_۱$ سرعت متحرک در لحظهٔ $t_۱$ و $\vec{v}_۲$ سرعت متحرک در لحظهٔ $t_۲$ است. همان‌طور که دیده می‌شود شتاب متوسط $(\vec{a}_{av})$، کمیتی برداری و هم‌جهت با بردار تغییر سرعت $(\Delta \vec{v})$ است[۱]. یکای SI شتاب متوسط، متر بر مربع ثانیه $(m/s^۲)$ است.

$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_۲ - \vec{v}_۱}{t_۲ - t_۱} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \qquad \text{(شتاب متوسط)} \qquad (۱ــ۵)$$

مثال ۱ــ ۸

خودرویی از حال سکون در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند. پس از ۱۲s، سرعت خودرو به ۲۴m/s در جهت محور x می‌رسد. شتاب متوسط خودرو را در این بازهٔ زمانی به‌دست آورید.



پاسخ: از رابطهٔ ۱ــ۵، داریم:

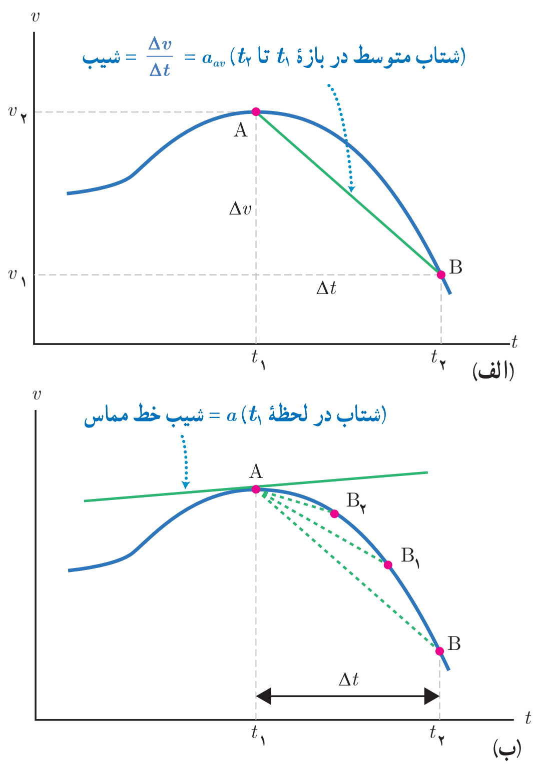
$$\vec{a}_{av} = \frac{\vec{v}_۲ - \vec{v}_۱}{t_۲ - t_۱} = \frac{(۲۴\,m/s)\,\vec{i} - (۰\,m/s)\,\vec{i}}{۱۲\,s - ۰\,s} = (۲\,m/s^۲)\,\vec{i}$$

همان‌طور که دیده می‌شود، اندازهٔ شتاب متوسط خودرو $۲/۰\,m/s^۲$ و شتاب در جهت محور x است.

اگر متحرک در یک راستا حرکت کند رابطهٔ ۱ــ۵ را می‌توان به‌صورت زیر به‌کار برد ولی با توجه به ماهیت برداری $v_۱$ و $v_۲$ باید به علامت‌های جبری آنها که نشان‌دهندهٔ جهت آنهاست توجه کنیم.

$$a_{av} = \frac{v_۲ - v_۱}{t_۲ - t_۱} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \qquad \text{(شتاب متوسط در حرکت بر خط راست)} \qquad (۱ــ۶)$$

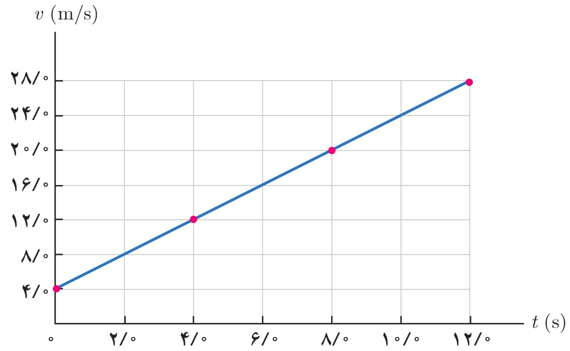
تعیین شتاب متوسط و لحظه‌ای به کمک نمودار سرعت ــ زمان: در شکل ۱ــ۹ الف، نمودار سرعت ــ زمان متحرکی نشان داده شده است که روی خط راست حرکت می‌کند. با توجه به تعریف شتاب متوسط، معلوم می‌شود، که شتاب متوسط بین دو لحظه برابر شیب خطی است که نمودار سرعت ــ زمان را در آن دو لحظه قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ــ۹ ب دیده می‌شود، اگر Δt به سمت صفر میل کند $(\Delta t \to ۰)$ خط واصل بین نقطه‌های A و B، به خط مماس بر نمودار در نقطهٔ A میل می‌کند. در این حالت، شیب خط مماس برابر شتاب متحرک در لحظهٔ $t_۱$ است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که: شتاب در هر لحظهٔ دلخواه t، برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت ــ زمان در آن لحظه است. در کتاب‌های فیزیک برای سادگی، شتاب لحظه‌ای را *شتاب* می‌نامند و آن را با نماد a نشان می‌دهند.



شکل ۱ــ۹ (الف) شتاب متوسط بین دو لحظهٔ $t_۱$ و $t_۲$
(ب) شتاب متحرک در لحظهٔ $t_۱$

۱ــ آموزش مسائلی که دانش‌آموزان را در محاسبهٔ $\vec{a}_{av} = \Delta\vec{v}/\Delta t$، درگیر عملیات برداری دو یا سه بعدی، در صفحهٔ xy یا فضای xyz می‌کند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

مثال ۱ــ ۹



نمودار سرعت ــ زمان موتورسواری که در امتداد محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۱۲/۰s، مطابق شکل روبه‌رو است. شتاب متوسط موتورسوار و جهت آن را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۲/۰s، ۴/۰s تا ۸/۰s، ۱۰/۰s تا ۱۲/۰s بیابید.

پاسخ : با توجه به داده‌های روی نمودار و بنا به رابطهٔ ۱ــ۶، شتاب متوسط موتورسوار، برای هر یک از بازه‌های زمانی خواسته شده، برابر است با :

بازهٔ زمانی ۰/۰ s تا ۲/۰s

$$a_{av}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{8/0\,m/s-4/0\,m/s}{2/0\,s-0/0\,s}=2/0\,m/s^2$$

بازهٔ زمانی ۴/۰ s تا ۸/۰s

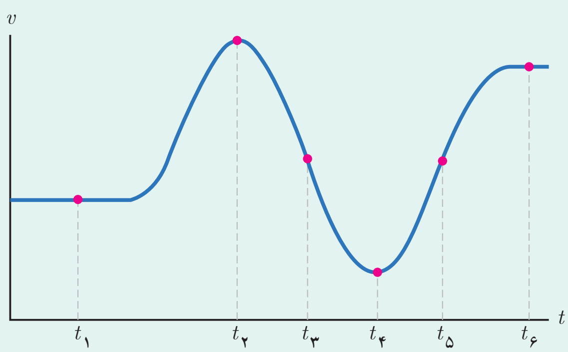
$$a_{av}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{20/0\,m/s-12/0\,m/s}{8/0\,s-4/0\,s}=2/0\,m/s^2$$

بازهٔ زمانی ۱۰/۰ s تا ۱۲/۰s

$$a_{av}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{28/0\,m/s-24/0\,m/s}{12/0\,s-10/0\,s}=2/0\,m/s^2$$

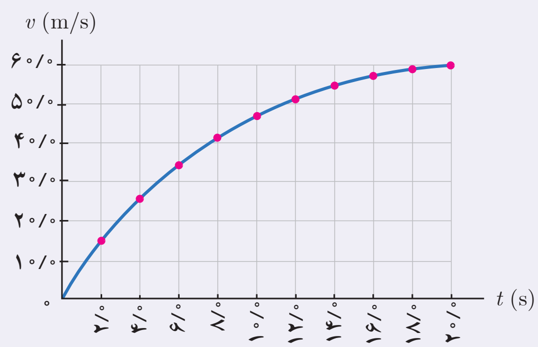
با توجه به علامت مثبت a_{av} در هر سه بازهٔ زمانی، شتاب متوسط در جهت مثبت محور x است. اگر در هر بازهٔ زمانی دلخواه دیگری نیز شتاب متوسط موتورسوار را حساب کنید با توجه به ثابت بودن شیب نمودار سرعت ــ زمان، اندازه و جهت یکسانی برای شتاب به‌دست می‌آید.

پرسش ۱ــ۶



شکل روبه‌رو نمودار سرعت ــ زمان دوچرخه‌سواری را نشان می‌دهد که در امتداد محور x در حرکت است. جهت شتاب دوچرخه‌سوار را در هر یک از لحظه‌های t_1، t_2، . . . و t_6 تعیین کنید.

تمرین ۱ــ۴



نمودار سرعت ــ زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۲۰/۰s مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

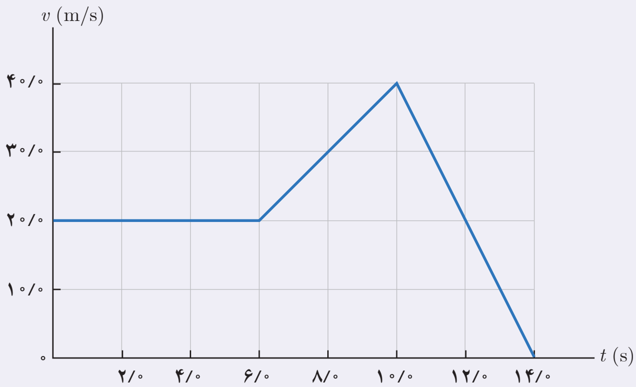
ب) شتاب خودرو را در لحظهٔ $t=8/0\,s$ به‌دست آورید.

تمرین ۱ــ۵

نمودار سرعت ــ زمان خودرویی که در راستای محور x حرکت می‌کند در بازهٔ زمانی صفر تا $۱۴/۰\,\text{s}$ مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) شتاب متوسط خودرو در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

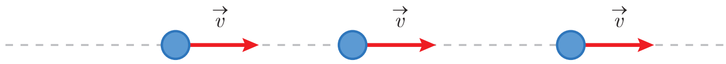
ب) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=۲/۰\,\text{s}$، $t=۸/۰\,\text{s}$ و $t=۱۱/۰\,\text{s}$ به‌دست آورید.



۱ــ۲ حرکت با سرعت ثابت

ساده‌ترین نوع حرکت، حرکت با سرعت ثابت است. در این نوع حرکت، اندازه و جهت سرعت متحرک در طول مسیر ثابت است (شکل ۱ــ۱۰). پیش از این و در مثال ۱ــ۵، با نمونه‌ای از حرکت با سرعت ثابت آشنا شدیم. در این مثال شیب نمودار مکان ــ زمان متحرک در طول حرکت ثابت و در نتیجه سرعت متوسط متحرک در هر بازهٔ زمانی دلخواه، برابر سرعت لحظه‌ای آن است. در این صورت می‌توان نوشت:

$$v = v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v\Delta t$$



شکل ۱ــ۱۰ در حرکت با سرعت ثابت، هم جهت سرعت و هم اندازهٔ آن (تندی) ثابت است.

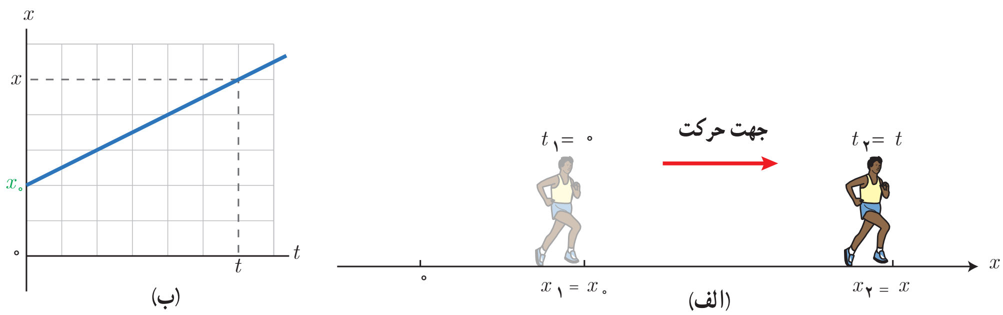
اگر مطابق شکل ۱ــ۱۱ متحرک در لحظهٔ $t_۱=۰$ در مکان $x_۱=x_۰$ و در لحظهٔ $t_۲=t$ در مکان $x_۲=x$ باشد، رابطهٔ اخیر را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$x - x_۰ = v(t - ۰)$$

یا:

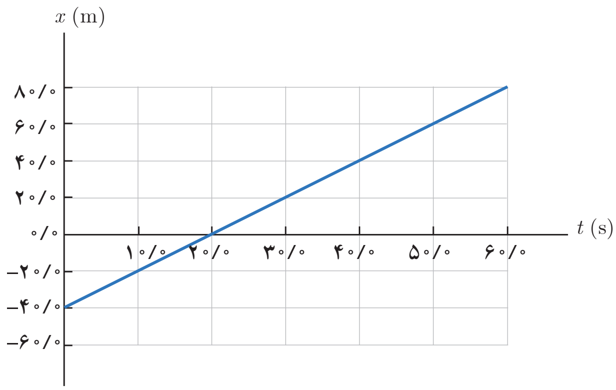
(۱ــ۷)	(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با سرعت ثابت)	$x = vt + x_۰$

در معادلهٔ ۱ــ۷ معمولاً $x_۰$ را که مکان متحرک در لحظهٔ $t=۰$ است مکان اولیهٔ متحرک می‌نامند. توجه کنید که مکان‌های $x_۰$ و x می‌توانند مثبت، منفی یا صفر باشند. سرعت متحرک هم به‌دلیل ماهیت برداری آن، در صورتی که حرکت در جهت محور x باشد مثبت و در غیر این صورت منفی است.



شکل ۱ــ۱۱ الف) مکان یک دونده در دو لحظهٔ متفاوت. ب) نمودار مکان-زمان دونده‌ای که در جهت محور x با سرعت ثابت می‌دود.

مثال ۱ــ۱۰



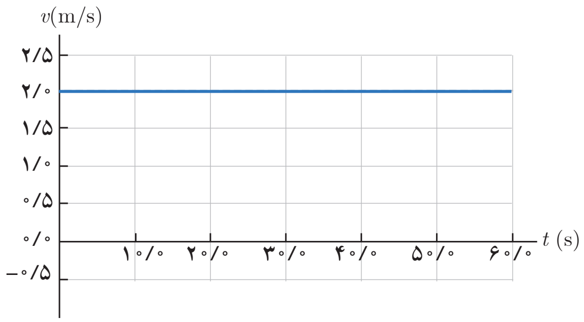
شکل روبه‌رو بخشی از نمودار مکان ــ زمان شخصی را نشان می‌دهد که با سرعت ثابت حرکت می‌کند.

الف) شخص در مبدأ زمان ($t=۰/۰\,\mathrm{s}$) در چه مکانی قرار دارد؟

ب) سرعت حرکت این شخص را به‌دست آورید و نمودار سرعت ــ زمان آن را رسم کنید.

پ) در چه لحظه یا لحظه‌هایی شخص در فاصلهٔ ۲۰/۰ متری از مبدأ محور قرار دارد؟

ت) اگر شخص به مدت $۵/۰۰\,\mathrm{min}$ به همین صورت حرکت کند، جابه‌جایی وی را در این مدت به‌دست آورید.



پاسخ : الف) با توجه به نمودار مکان ــ زمان، در $t=۰/۰\,\mathrm{s}$ شخص در مکان اولیهٔ $x_۰=-۴۰/۰\,\mathrm{m}$ قرار دارد.

ب) با توجه به داده‌های روی نمودار و قرار دادن داده‌های یک لحظهٔ دلخواه (برای مثال $t=۳۰/۰\,\mathrm{s}$ و $x=۲۰/۰\,\mathrm{m}$) در رابطهٔ ۱ــ۷، داریم :

$$x=vt+x_۰ \Rightarrow ۲۰\,\mathrm{m}=v(۳۰\,\mathrm{s})+(-۴۰\,\mathrm{m})$$

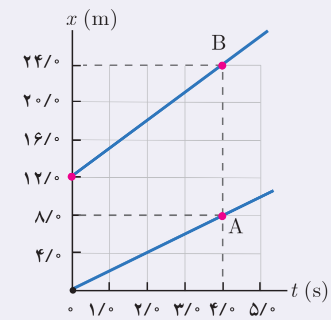
در نتیجه $v=+۲/۰\,\mathrm{m/s}$ به‌دست می‌آید. علامت مثبت نشان می‌دهد که شخص در جهت محور x حرکت می‌کند. نمودار سرعت ــ زمان مطابق شکل بالا است.

پ) در لحظه‌های $t=۱۰/۰\,\mathrm{s}$ و $t=۳۰/۰\,\mathrm{s}$. توجه کنید که فاصله از مبدأ مکان، $|x|$ است و نه خودِ x.

ت) با قرار دادن $t=۵/۰۰\,\mathrm{min}=۳۰۰\,\mathrm{s}$ در رابطهٔ $\Delta x=v\Delta t$ داریم :

$$\Delta x=v\Delta t \Rightarrow \Delta x=(۲/۰\,\mathrm{m/s})(۳۰۰\,\mathrm{s})=۶۰۰\,\mathrm{m}$$

تمرین ۱ــ۶



شکل مقابل نمودار مکان ــ زمان دو متحرک A و B را نشان می‌دهد که در راستای محور x حرکت می‌کنند.

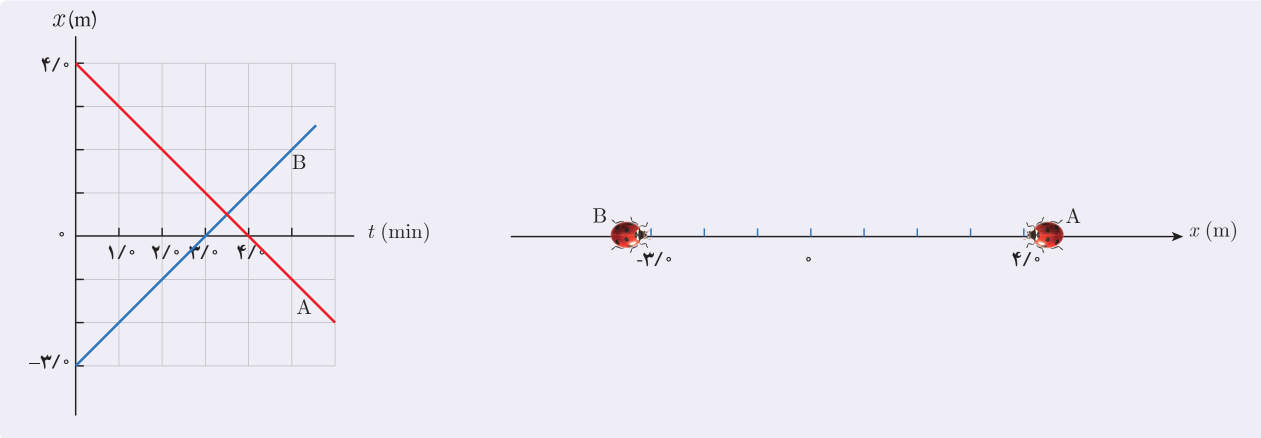
سرعت هر متحرک را پیدا کنید و معادلهٔ مکان ــ زمان آنها را بنویسید.

تمرین ۱ــ۷

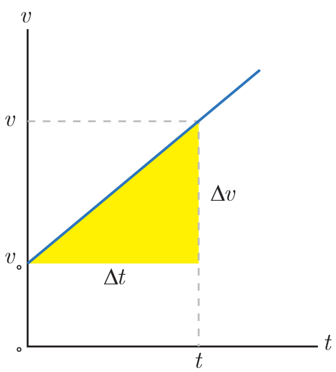
شکل الف، مکان دو کفش‌دوزک A و B را که در راستای محور x حرکت می‌کنند در لحظهٔ $t=۰\,\mathrm{s}$ نشان می‌دهد. نمودار مکان ــ زمان این کفش‌دوزک‌ها در شکل ب رسم شده است.

الف) از روی نمودار به‌طور تقریبی تعیین کنید کفش‌دوزک‌ها در چه لحظه و در چه مکانی به یکدیگر می‌رسند.

ب) با استفاده از معادلهٔ مکان ــ زمان، زمان و مکان هم‌رسی کفش‌دوزک‌ها را پیدا کنید.



۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت



شکل ۱ــ۱۲ نمودار vــt در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن $v_\circ$ و a



شکل ۱ــ۱۳ نمودار aــt در حرکت با شتاب ثابت با فرض مثبت بودن a

شکل ۱ــ۱۲ نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد خط راست حرکت می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت متحرک با زمان به‌صورت خطی تغییر می‌کند و شیب نمودار سرعت ــ زمان ثابت است. پیش از این و در مثال ۱ــ۸ دیدیم در این شرایط، شتاب متوسط ($a_{av}=\Delta v/\Delta t$) در بازه‌های زمانی مختلف یکسان است. در چنین حرکتی شتاب متوسط در هر بازهٔ زمانی برابر شتاب لحظه‌ای متحرک است، یعنی $a_{av}=a$.

هر گاه شتاب متحرکی در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، حرکت جسم را حرکت با شتاب ثابت می‌نامیم (شکل ۱ــ۱۳). حرکت با شتاب ثابت نوع خاصی از حرکت است و در زندگی روزمره، با حرکت اجسامی که شتاب آنها ثابت یا تقریباً ثابت است زیاد سر وکار داریم. جسمی که روی سطح هموار یک سراشیبی در حال لغزیدن است، یا جسمی که در حال سقوط است و اثر مقاومت هوا بر آن ناچیز باشد دارای حرکت با شتاب ثابت‌اند. همچنین خودرویی که پس از سبز شدن چراغ، شروع به حرکت می‌کند یا هواپیمایی که روی باند پرواز حرکت می‌کند تا به شرایط لازم برای برخاستن برسد مثال‌هایی از حرکت با شتاب تقریباً ثابت‌اند. به‌دلیل اهمیت و رایج بودن حرکت‌های با شتاب ثابت، در ادامه با معادلات این نوع حرکت آشنا می‌شویم.

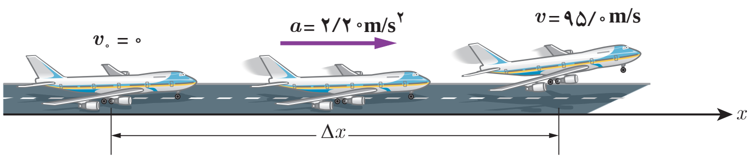
معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر مانند نمودار شکل ۱ــ۱۲ در $t=\circ$ سرعت اولیهٔ متحرک $v_\circ$ و در لحظهٔ t، سرعت متحرک برابر v باشد در این صورت معادلهٔ ۱ــ۶ را برای حرکت با شتاب ثابت ($a=a_{av}$) در امتداد خط راست می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم :

$$v=at+v_\circ$$ (معادلهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت) (۱ــ۸)

همان‌طور که دیده می‌شود تغییرات v نسبت به t در معادلهٔ ۱ــ ۸ به‌صورت یک تابع خطی است. به همین دلیل سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا t برابر است با میانگین سرعت متحرک در این دو لحظه، یعنی :

$$v_{av}=\frac{v_\circ+v}{۲}$$ (معادلهٔ سرعت متوسط در حرکت با شتاب ثابت) (۱ــ۹)

مثال ۱ــ۱۱



شکل روبه‌رو هواپیمایی را نشان می‌دهد که از حال سکون و با شتاب ثابت روی باند پرواز و در امتداد محور x شروع به حرکت می‌کند.

الف) چه مدت طول می‌کشد تا هواپیما به شرایط برخاستن برسد؟

ب) سرعت متوسط هواپیما در این بازهٔ زمانی چقدر است؟

پ) جابه‌جایی هواپیما در این مدت چقدر است؟

پاسخ: الف) با توجه به ثابت بودن شتاب حرکت هواپیما روی باند پرواز، داده‌های روی شکل را می‌توان در معادلهٔ ۱ــ۸ جای‌گذاری کرد. به این ترتیب داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow ۹۵/۰ m/s = (۲/۲۰ m/s^2)t + ۰/۰ m/s \Rightarrow t = ۴۳/۲ s$$

در اولین فرصتی که سوار هواپیما شدید، نتیجهٔ به‌دست آمده را وارسی کنید!

ب)

$$v_{av} = \frac{v_0 + v}{۲} = \frac{۰/۰ m/s + ۹۵/۰ m/s}{۲} = ۴۷/۵ m/s$$

پ) از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم:

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta x = v_{av}\Delta t = (۴۷/۵ m/s)(۴۳/۲ s) = ۲/۰۵ \times ۱۰^3 m$$

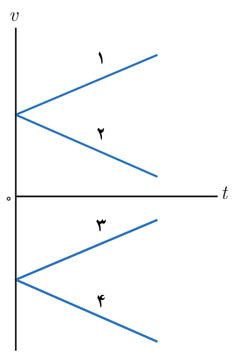
تمرین ۱ــ۸

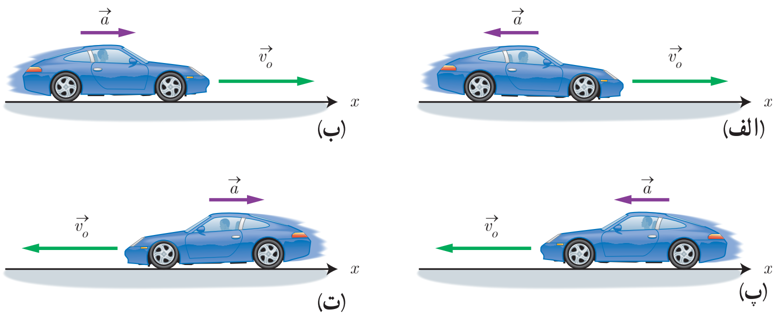
معادلهٔ سرعت ــ زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند در SI به‌صورت $v=-۱/۸t+۲/۲$ است.

الف) سرعت متحرک در لحظهٔ $t=۴/۰ s$ چقدر است؟ ب) سرعت متوسط متحرک و جابه‌جایی آن در بازهٔ زمانی صفر تا $t=۴/۰ s$ چقدر است؟ پ) نمودار سرعت ــ زمان این متحرک را رسم کنید.

فعالیت ۱ــ۲

در تمامی حالت‌های شکل زیر، خودروها در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت‌اند. حرکت هر یک از خودروها، توسط کدام‌یک از نمودارهای $v-t$ توصیف می‌شود؟ همچنین توضیح دهید تندی کدام خودرو در حال افزایش (حرکت تندشونده) و تندی کدام خودرو در حال کاهش (حرکت کُندشونده) است.





معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت : اگر جسمی که با شتاب ثابت و در امتداد محور x حرکت می‌کند در $t=۰$ در مکان $x_۰$ و دارای سرعت $v_۰$ باشد، در این صورت از رابطه‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۹ داریم :

$$v_{av}=\frac{\Delta x}{\Delta t}\Rightarrow\frac{v+v_۰}{۲}=\frac{x-x_۰}{t-۰}\Rightarrow x=(\frac{v+v_۰}{۲})t+x_۰$$

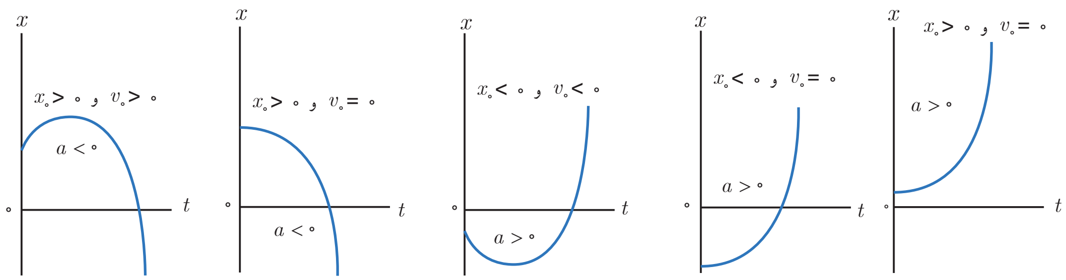
با قرار دادن رابطهٔ ۱ــ۸ در معادلهٔ بالا داریم :

$$x=(\frac{at+v_۰+v_۰}{۲})t+x_۰$$

با ساده‌سازی این رابطه خواهیم داشت :

(۱ــ۱۰) (معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت) $x=\frac{۱}{۲}at^۲+v_۰t+x_۰$

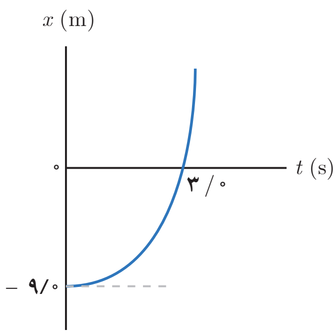
همان‌طور که دیده می‌شود در این نوع حرکت، مکان متحرک تابعی درجهٔ دوم از زمان است. با رسم تابع‌های درجهٔ دوم در ریاضی ۱ پایهٔ دهم آشنا شدید. شکل ۱ــ۱۴ نمودار $x-t$ را برای چند حالت مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱ــ۱۴ نمودار مکان-زمان در حرکت با شتاب ثابت برای چند حالت متفاوت

مثال ۱ــ۱۲

شکل روبه‌رو نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که با شتاب ثابت در امتداد محور x حرکت می‌کند. الف) شتاب متحرک را پیدا کنید. ب) معادلهٔ سرعت ــ زمان متحرک را بنویسید و نمودار آن را رسم کنید. پ) جابه‌جایی متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰s پیدا کنید. ت) با توجه به اینکه مساحت سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در هر بازهٔ زمانی برابر جابه‌جایی در آن بازه است، جابه‌جایی متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰s حساب کنید و نتیجه را با قسمت پ مقایسه کنید. ث) سرعت متوسط متحرک را در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰s پیدا کنید.



پاسخ : الف) شیب خط‌چین مماس بر منحنی در $t=۰/۰s$ برابر صفر است و نشان‌دهندهٔ این است که سرعت متحرک در این لحظه صفر است $(v_۰=۰/۰\ m/s)$. با توجه به داده‌های روی نمودار و معادلهٔ ۱ــ۱۰ داریم :

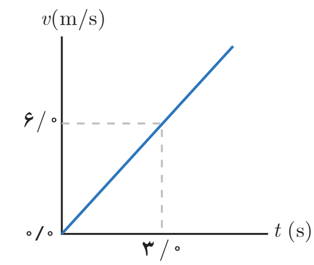
$$x_۰=-۹/۰m\quad,\quad t=۳/۰s\rightarrow x=۰/۰m\quad,\quad v_۰=۰/۰m/s$$

$$x=\frac{۱}{۲}at^۲+v_۰t+x_۰\Rightarrow ۰=\frac{۱}{۲}a(۳/۰s)^۲+۰+(-۹/۰m)\Rightarrow a=۲/۰\,m/s^۲$$

ب) از معادلهٔ ۱ــ۸ داریم :

$$v=at+v_۰\Rightarrow v=(۲/۰\,m/s^۲)t+۰\Rightarrow v=(۲/۰\,m/s^۲)t$$

نمودار این معادله در شکل روبه‌رو رسم شده است.



پ) با توجه به نمودار مکان ــ زمان، جابه‌جایی متحرک در بازهٔ زمانی $(0/0\,s, 3/0\,s)$ برابر $\Delta x = 0/0 - (-9/0\,m) = 9/0\,m$ است.

ت) سطح بین منحنی سرعت و محور زمان در نمودار سرعت ــ زمان، برابر $(\frac{1}{2}\times 6/0\,m/s)(3/0\,s) = 9/0\,m$ است که با نتیجهٔ قسمت پ سازگار است.

ث) از رابطهٔ ۱ــ۴ داریم :

$$v_{av} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{9/0\,m}{3/0\,s} = 3/0\,m/s$$

توجه کنید که می‌توانستیم سرعت متوسط در این بازهٔ زمانی را از رابطهٔ $v_{av} = \frac{(v_0 + v)}{2}$ نیز حساب کنیم که به همین نتیجه می‌رسد.

تمرین ۱ــ۹

خودرویی با سرعت $18/0\,km/h$ در امتداد مسیری مستقیم از چهارراهی می‌گذرد تندی آن با شتاب $1/0\,m/s^2$ افزایش می‌یابد. سرعت خودرو پس از $300\,m$ جابه‌جایی چقدر است؟

معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت : اگر هنگام بررسی حرکت جسمی، زمان t معلوم نباشد، می‌توان از معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی برای پیدا کردن یکی از کمیت‌های جابه‌جایی Δx، سرعت اولیه v_0، سرعت v، یا شتاب a متحرک استفاده کرد. برای به‌دست آوردن این معادله از رابطه‌های ۱ــ۴ و ۱ــ۹ شروع می‌کنیم. به این ترتیب مشابه آنچه هنگام به‌دست آوردن معادلهٔ مکان ــ زمان دیدیم می‌توان نوشت :

$$x = (\frac{v + v_0}{2})t + x_0$$

با به‌دست آوردن t از معادلهٔ ۱ــ۸ و قرار دادن آن در رابطهٔ بالا داریم :

$$x = (\frac{v + v_0}{2})(\frac{v - v_0}{a}) + x_0$$

در این صورت داریم :

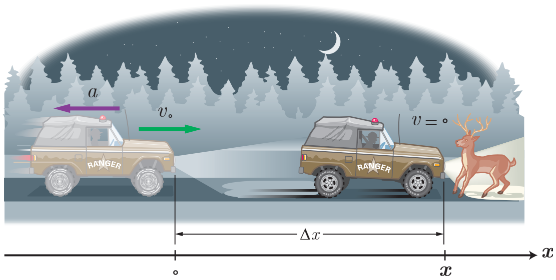
$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \qquad \text{(معادلهٔ سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت)} \quad (۱ــ۱۱)$$

اگرچه این رابطه را برای بازهٔ زمانی صفر تا t به‌دست آوردیم، برای هر بازهٔ زمانی دلخواه t_1 تا t_2 نیز می‌توانیم از رابطهٔ زیر استفاده کنیم که در آن x_1 و v_1 متناظر با لحظهٔ t_1 و همچنین x_2 و v_2 متناظر با لحظهٔ t_2 هستند.

$$v_2^2 = v_1^2 + 2a(x_2 - x_1)$$

مثال ۱ ــ ۱۳

محیط‌بان یک پارک حفاظت شده هنگام گشت شبانه، با تندی $40/0\,km/h$ در جاده‌ای مستقیم در حرکت است که ناگهان گوزنِ بدون حرکتی را در جلوی خود می‌بیند و ترمز می‌گیرد (شکل روبه‌رو). حرکت خودرو با شتابی به اندازهٔ $3/80\,m/s^2$ کُند می‌شود تا سرانجام متوقف شود. اگر لحظه‌ای که محیط‌بان ترمز می‌گیرد، گوزن در فاصلهٔ $22/0$ متری از خودرو باشد،



الف) خودرو در چه فاصله‌ای از گوزن متوقف می‌شود؟

ب) چه مدت طول می‌کشد تا خودرو متوقف شود؟

پاسخ : الف) حرکت خودرو را در جهت محور x فرض می‌کنیم. همچنین برای سادگی، مبدأ زمان و مکان را جایی می‌گیریم که محیط‌بان ترمز گرفته و در نتیجه $x_0 = ۰/۰\,m$ و $v_0 = ۴۰/۰\,km/h = ۱۱/۱\,m/s$ است. از طرفی، چون سرعت خودرو در جهت محور x به‌تدریج در حال کاهش است، شتاب آن بر خلاف جهت محور x و در نتیجه منفی خواهد شد. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ــ۱۱ داریم:

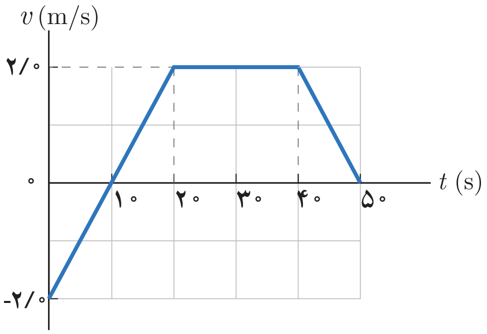
$$v^۲ - v_0^۲ = ۲a(x - x_0) \Rightarrow ۰ - (۱۱/۱\,m/s)^۲ = ۲(-۳/۸۰\,m/s^۲)(x - ۰)$$

در نتیجه $x = ۱۶/۲\,m$ و خودرو در فاصلهٔ $(۲۲/۰\,m - ۱۶/۲\,m) = ۵/۸۰\,m$ از گوزن متوقف می‌شود و خوشبختانه برخوردی بین خودرو و گوزن صورت نمی‌گیرد.

ب) از رابطهٔ ۱ــ۸ داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow ۰/۰\,m/s = (-۳/۸۰\,m/s^۲)t + ۱۱/۱\,m/s \Rightarrow t = ۲/۹۲\,s$$

مثال ۱ــ ۱۴



متحرکی که در راستای محور x حرکت می‌کند در لحظهٔ $t = ۰$ از مکان $x_0 = ۰$ می‌گذرد. نمودار سرعت ــ زمان این متحرک مطابق شکل روبه‌رو است.

الف) متحرک در کدام بازهٔ زمانی، در جهت محور x و در کدام بازهٔ زمانی در خلاف جهت محور x حرکت کرده است؟

ب) در چه لحظه یا لحظه‌هایی جهت حرکت متحرک تغییر کرده است؟

پ) با توجه به نمودار سرعت ــ زمان توضیح دهید در کدام بازه‌های زمانی حرکت جسم تندشونده و یا کُندشونده است.

ت) مکان متحرک را در هر یک از لحظه‌های $t_1 = ۱۰\,s$، $t_2 = ۲۰\,s$، $t_3 = ۴۰\,s$ و $t_4 = ۵۰\,s$ پیدا کنید و روی محور x نشان دهید.

ث) مسیر حرکت متحرک را رسم کنید و با توجه به آن، جابه‌جایی و مسافت طی شده را در کل زمان حرکت پیدا کنید.

ج) مساحت سطح زیر نمودار vــt را حساب کنید و مقدار آن را با جابه‌جایی متحرک در قسمت قبل مقایسه کنید. مساحت بخشی از سطح را که زیر محور است منفی بگیرید.

پاسخ : الف) با توجه به نمودار، در بازهٔ زمانی صفر تا $t_1 = ۱۰\,s$، سرعت متحرک منفی است و بنابراین در جهت منفی محور x حرکت کرده است. همچنین در بازهٔ زمانی $t_1 = ۱۰\,s$ تا $t_4 = ۵۰\,s$، سرعت متحرک مثبت است و بنابراین در جهت مثبت محور x حرکت کرده است.

ب) تنها در لحظهٔ $t_1 = ۱۰\,s$ علامت سرعت و در نتیجه جهت حرکت متحرک تغییر کرده است.

پ) در بازهٔ زمانی صفر تا $t_1 = ۱۰\,s$، تندی در حال کاهش و در نتیجه حرکت کُندشونده است.

در بازهٔ زمانی $t_1 = ۱۰\,s$ تا $t_2 = ۲۰\,s$، تندی در حال افزایش و در نتیجه حرکت تندشونده است.

در بازهٔ زمانی $t_2 = ۲۰\,s$ تا $t_3 = ۴۰\,s$، حرکت با سرعت ثابت است.

در بازهٔ زمانی $t_3 = ۴۰\,s$ تا $t_4 = ۵۰\,s$، تندی در حال کاهش و در نتیجه حرکت کُندشونده است.

ت) در بازهٔ زمانی صفر تا $t_2 = ۲۰\,s$ حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب از معادلهٔ ۱ــ۸ داریم:

$$v = at + v_0 \Rightarrow (۲/۰\,m/s) = a(۲۰\,s) + (-۲/۰\,m/s) \Rightarrow a = ۰/۲۰\,m/s^۲$$

در این صورت با توجه به معادلهٔ ۱ــ۱۰، در لحظهٔ $t_1 = ۱۰\,s$ داریم:

$$x = \frac{۱}{۲}at^۲ + v_0 t + x_0 \Rightarrow x_1 = \frac{۱}{۲}(۰/۲۰\,m/s^۲)(۱۰\,s)^۲ + (-۲/۰\,m/s)(۱۰\,s) + ۰ \Rightarrow x_1 = -۱۰\,m$$

در لحظهٔ $t_۲ = ۲۰\,s$ داریم :

$$x = \frac{۱}{۲}at^۲ + v_{۰}t + x_{۰} \Rightarrow x_۲ = \frac{۱}{۲}(۰/۲۰\,m/s^۲)(۲۰\,s)^۲ + (-۲/۰\,m/s)(۲۰\,s) + ۰ \Rightarrow x_۲ = ۰$$

در بازهٔ زمانی $۲۰\,s$ تا $۴۰\,s$، حرکت با سرعت ثابت روی خط راست است. به این ترتیب با توجه به معادلهٔ ۱ــ۷، جابه‌جایی در این بازهٔ زمانی برابر است با :

$$\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta x = (۲/۰\,m/s)(۴۰\,s - ۲۰\,s) = ۴۰\,m$$

در نتیجه متحرک در لحظهٔ $t_۳ = ۴۰\,s$ در مکان $x_۳ = x_۲ + \Delta x = ۰ + ۴۰\,m = ۴۰\,m$ قرار دارد.

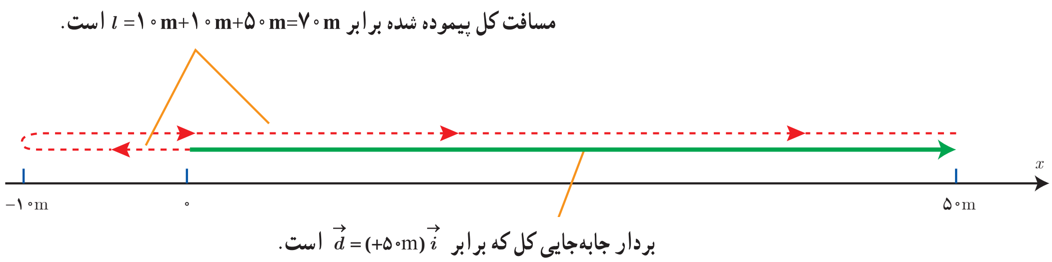
در بازهٔ زمانی $۴۰\,s$ تا $۵۰\,s$، حرکت با شتاب ثابت است. به این ترتیب داریم :

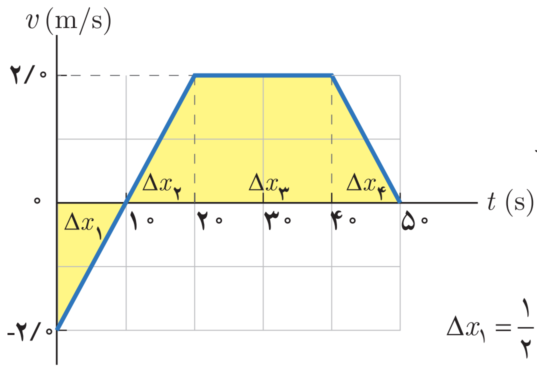
$$\Delta x = (\frac{v_۱ + v_۲}{۲})\Delta t = (\frac{۲/۰\,m/s + ۰}{۲})(۱۰\,s) \Rightarrow \Delta x = ۱۰\,m$$

در نتیجه متحرک در لحظهٔ $t_۴ = ۵۰\,s$ در مکان $x_۴ = x_۳ + \Delta x = ۴۰\,m + ۱۰\,m = ۵۰\,m$ قرار دارد.



ث) در شکل زیر جابه‌جایی و مسافت طی شده توسط متحرک در کل زمان حرکت نشان داده شده است.





ج) مساحت سطح زیر نمودار سرعت ــ زمان که با رنگ زرد در شکل مشخص شده است، برابر جابه‌جایی متحرک است. به این ترتیب برای هر یک از بازه‌های زمانی داریم :

$$\Delta x_۱ = \frac{۱}{۲}(-۲/۰\,m/s)(۱۰\,s) = -۱۰\,m \qquad \Delta x_۲ = \frac{۱}{۲}(۲/۰\,m/s)(۱۰\,s) = ۱۰\,m$$

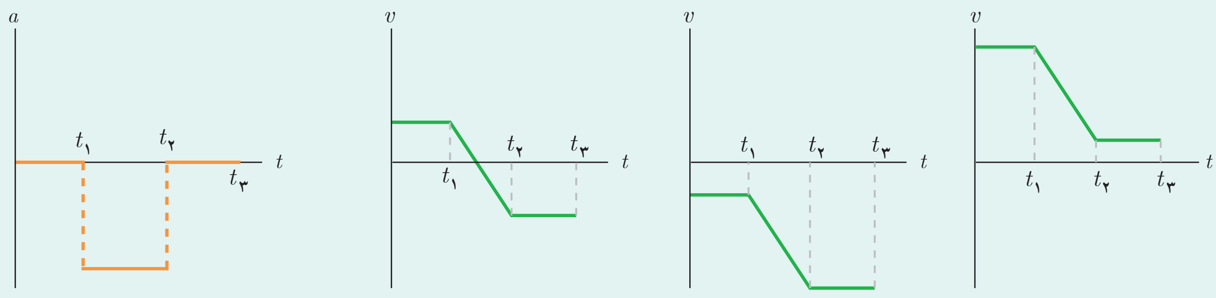
$$\Delta x_۳ = (۲/۰\,m/s)(۲۰\,s) = ۴۰\,m \qquad \Delta x_۴ = \frac{۱}{۲}(۲/۰\,m/s)(۱۰\,s) = ۱۰\,m$$

$$\Delta x = \Delta x_۱ + \Delta x_۲ + \Delta x_۳ + \Delta x_۴ = -۱۰\,m + ۱۰\,m + ۴۰\,m + ۱۰\,m = ۵۰\,m$$

همان‌طور که از نتیجهٔ بالا دیده می‌شود، مساحت سطح بین نمودار سرعت ــ زمان و محور زمان در کل زمان حرکت، با جابه‌جایی متحرک برابر است.

پرسش ۱ــ۷

نمودار شتاب ــ زمان متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. توضیح دهید چگونه هر یک از نمودارهای سرعت ــ زمان شکل‌های الف، ب و پ می‌تواند متناظر با این نمودار شتاب ــ زمان باشد.



(پ) (ب) (الف)

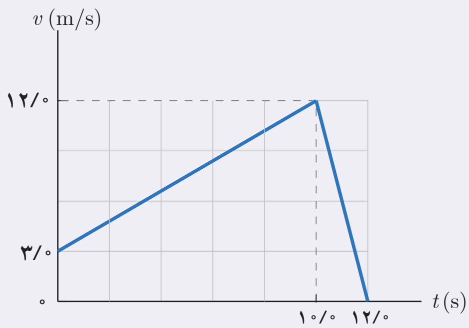
تمرین ۱ــ۱۰

آهویی در مسیری مستقیم در امتداد محور x می‌دود. نمودار سرعت ــ زمان آهو در بازهٔ زمانی صفر تا ۱۲/۰s مطابق شکل است. در این بازهٔ زمانی

الف) مسافت کل پیموده شده توسط آهو را به‌دست آورید.

ب) جابه‌جایی آهو را پیدا کنید.

پ) نمودار شتاب ــ زمان آهو را رسم کنید.



تمرین ۱ــ۱۱

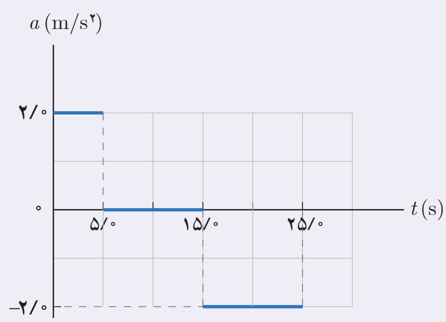
شکل مقابل نمودار شتاب ــ زمان یک ماشین اسباب بازی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند. با فرض $x_0=0$ و $v_0=0$، در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۵/۰s،

الف) نمودارهای سرعت ــ زمان و مکان ــ زمان این ماشین را رسم کنید.

ب) با توجه به نمودار سرعت ــ زمان، مشخص کنید در کدام یک از بازه‌های زمانی، حرکت ماشین تندشونده، کُندشونده یا با سرعت ثابت است.

پ) شتاب متوسط ماشین را پیدا کنید.

ت) جابه‌جایی ماشین را پیدا کنید.



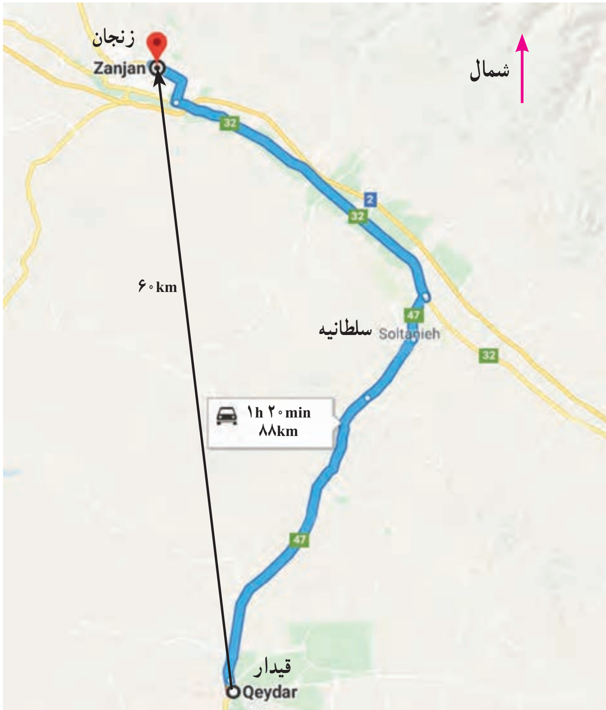
۱ـ۱ شناخت حرکت

۱. با توجه به داده‌های نقشهٔ شکل زیر،

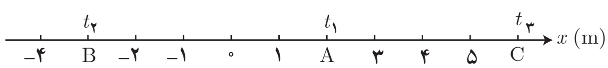
الف) تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط خودرو را پیدا کنید.

ب) مفهوم فیزیکی این دو کمیت چه تفاوتی با یکدیگر دارد؟

پ) در چه صورت تندی متوسط و اندازهٔ سرعت متوسط می‌توانست تقریباً با یکدیگر برابر باشد؟



۲. متحرکی مطابق شکل در لحظهٔ t_1 در نقطهٔ A، در لحظهٔ t_2 در نقطهٔ B و در لحظهٔ t_3 در نقطهٔ C قرار دارد.



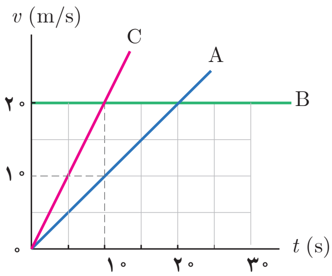
الف) بردارهای مکان متحرک را در هر یک از این لحظه‌ها روی محور x رسم کنید و برحسب بردار یکه بنویسید.

ب) بردار جابه‌جایی متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی t_1 تا t_2، t_2 تا t_3 و t_1 تا t_3 به‌دست آورید.

۳. در شکل زیر نمودار سرعت ــ زمان سه متحرک نشان داده شده است.

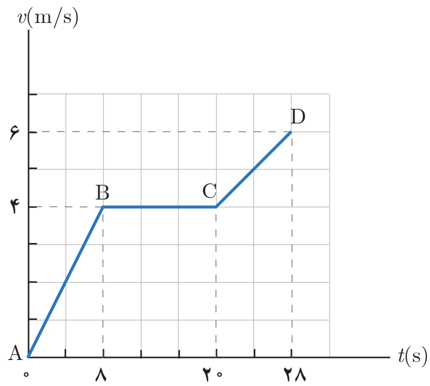
الف) شتاب سه متحرک را به طور کیفی با یکدیگر مقایسه کنید.

ب) شتاب هر متحرک را به دست آورید.



پ) در بازهٔ زمانی ۰s تا ۱۰s جابه‌جایی این سه متحرک را پیدا کنید.

۴. شکل زیر نمودار سرعت ــ زمان متحرکی را که در امتداد محور x حرکت می‌کند در مدت ۲۸ ثانیه نشان می‌دهد.



الف) شتاب در هر یک از مرحله‌های AB، BC و CD چقدر است؟

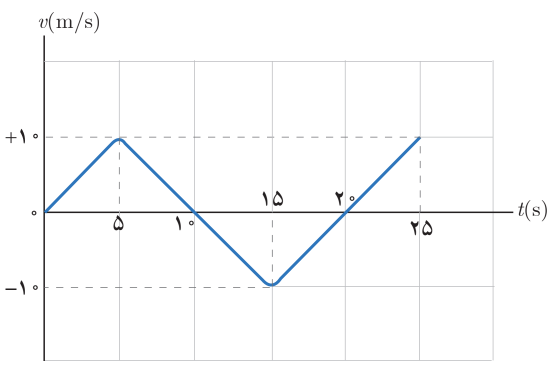
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی صفر تا ۲۸ ثانیه چقدر است؟

پ) جابه‌جایی متحرک را در این بازهٔ زمانی پیدا کنید.

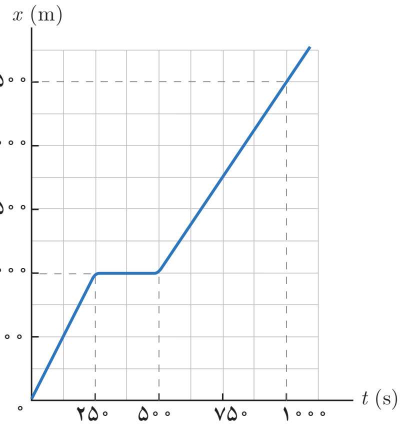
۵. نمودار سرعت ــ زمان متحرکی مطابق شکل زیر است.

الف) نمودار شتاب ــ زمان این متحرک را رسم کنید.

ب) اگر $x_\circ = -10\,m$ باشد نمودار مکان ــ زمان متحرک را رسم کنید.



۶. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان حرکت یک دوندهٔ دوی نیمه‌استقامت را در امتداد یک خط راست نشان می‌دهد.



الف) در کدام بازهٔ زمانی دونده سریع‌تر دویده است؟

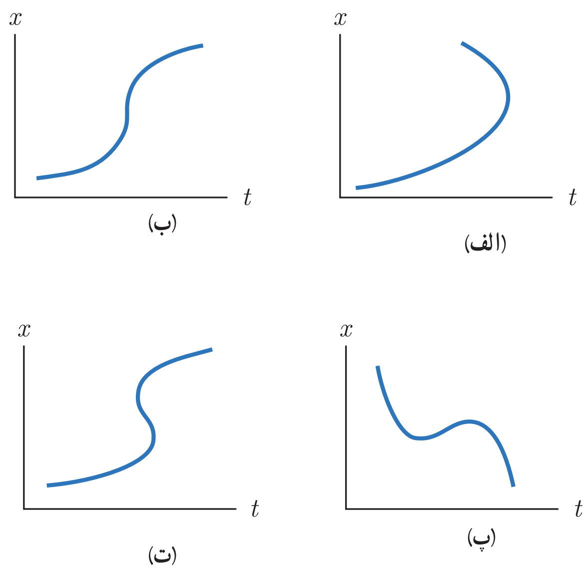
ب) در کدام بازهٔ زمانی، دونده ایستاده است؟

پ) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۰s تا ۲۵۰s حساب کنید.

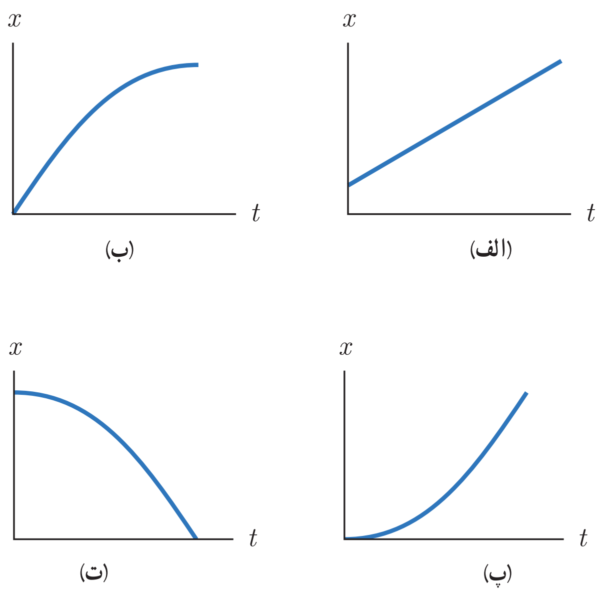
ت) سرعت دونده را در بازهٔ زمانی ۵۰۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.

ث) سرعت متوسط دونده را در بازهٔ زمانی ۰s تا ۱۰۰۰s حساب کنید.

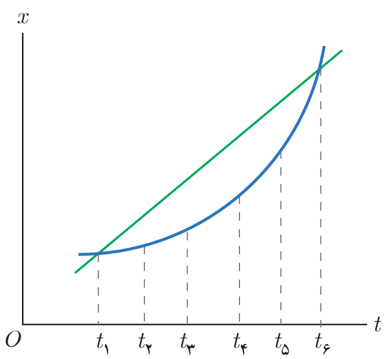
۷. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان ــ زمان شکل زیر می‌تواند نشان‌دهندهٔ نمودار t ــ x یک متحرک باشد.



۸. توضیح دهید از نمودارهای مکان ــ زمان شکل زیر کدام موارد حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که از حال سکون شروع به حرکت کرده و به‌تدریج بر تندی آن افزوده شده است.



۹. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که در جهت محور x در حرکت‌اند.

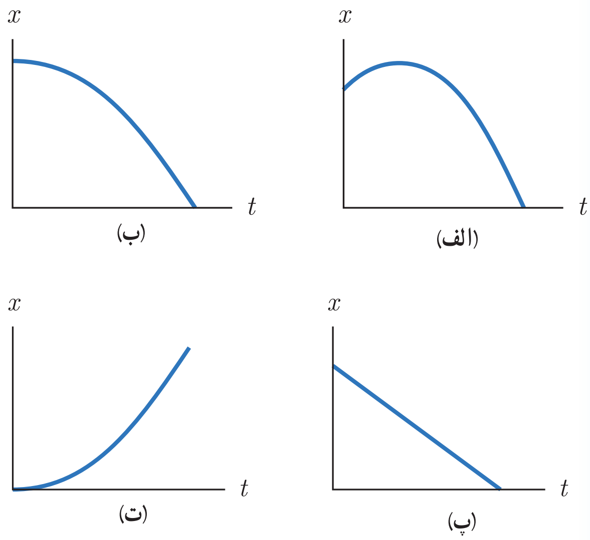


الف) در چه لحظه‌هایی دو خودرو از کنار یکدیگر می‌گذرند؟

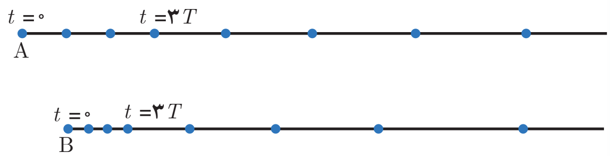
ب) در چه لحظه‌ای تندی دو خودرو تقریباً یکسان است؟

پ) سرعت متوسط دو خودرو را در بازهٔ زمانی t_1 تا t_6 با هم مقایسه کنید.

۱۰. توضیح دهید کدام یک از نمودارهای مکان ــ زمان نشان داده شده، حرکت متحرکی را توصیف می‌کند که سرعت اولیهٔ آن در جهت محور x و شتاب آن بر خلاف جهت محور x است.



۱۱. هر یک از شکل‌های زیر مکان یک خودرو را در لحظه‌های $t=0$، $t=T$، $t=2T$، ... و $t=7T$ نشان می‌دهد. هر دو خودرو در لحظهٔ $t=3T$ شتاب می‌گیرند. توضیح دهید،



الف) سرعت اولیهٔ کدام خودرو بیشتر است.

ب) سرعت نهایی کدام خودرو بیشتر است.

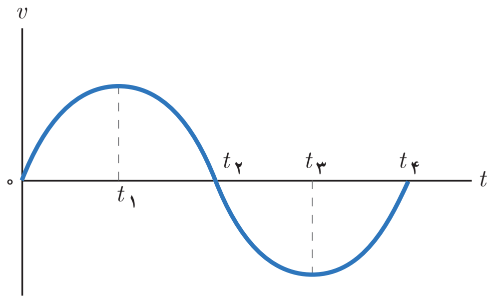
پ) کدام خودرو شتاب بیشتری دارد.

۱۲. معادلهٔ حرکت جسمی در SI به‌صورت $x=t^3-3t^2+4$ است.

الف) مکان متحرک را در $t=0\,s$ و $t=2\,s$ به‌دست آورید.

ب) سرعت متوسط جسم را در بازهٔ زمانی صفر تا ۲ ثانیه پیدا کنید.

۱۳. نمودار سرعت ــ زمان متحرکی در شکل زیر نشان داده شده است. تعیین کنید در کدام بازه‌های زمانی بردار شتاب در جهت محور x و در کدام بازه‌های زمانی در خلاف جهت محور x است.



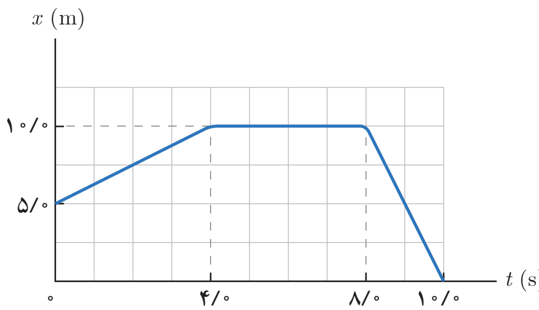
۱ــ۲ حرکت با سرعت ثابت

۱۴. جسمی با سرعت ثابت بر مسیری مستقیم در حرکت است. اگر جسم در لحظهٔ $t_1=5/0\,s$ در مکان $x_1=6/0\,m$ و در لحظهٔ $t_2=20/0\,s$ در مکان $x_2=36/0\,m$ باشد،

الف) معادلهٔ مکان ــ زمان جسم را بنویسید.

ب) نمودار مکان ــ زمان جسم را رسم کنید.

۱۵. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x حرکت می‌کند.



الف) جابه‌جایی و مسافت پیموده شده توسط متحرک در کل زمان حرکت چقدر است؟

ب) سرعت متوسط متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۴/۰s، ۴/۰s تا ۸/۰s، ۸/۰s تا ۱۰/۰s و همچنین در کل زمان حرکت به‌دست آورید.

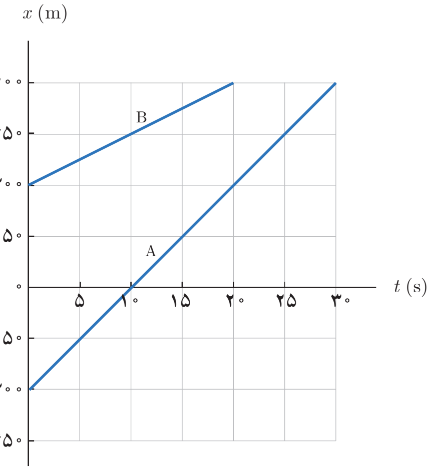
پ) معادلهٔ حرکت متحرک را در هر یک از بازه‌های زمانی ۰/۰s تا ۴/۰s، ۴/۰s تا ۸/۰s، و ۸/۰s تا ۱۰/۰s بنویسید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۱۶. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان دو خودرو را نشان می‌دهد که روی خط راست حرکت می‌کنند.

الف) معادلهٔ حرکت هر یک از آنها را بنویسید.

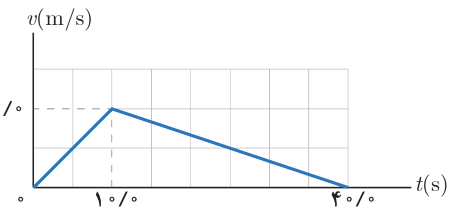
ب) اگر خودروها با همین سرعت حرکت کنند، در چه زمان و مکانی به هم می‌رسند؟



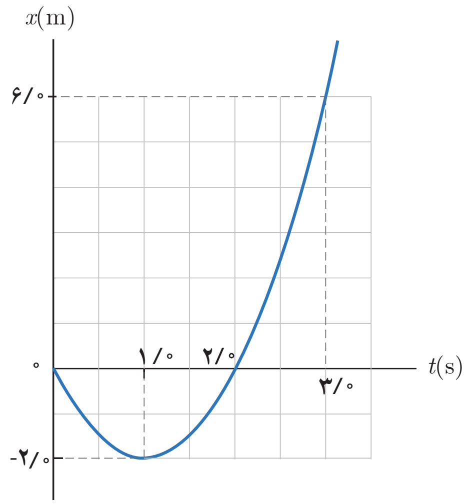
۱۷. دانستن محل قرارگیری یک ماهواره در مأموریت‌های فضایی و اطمینان از اینکه ماهواره در مدار پیش‌بینی شده قرار گرفته، یکی از مأموریت‌های کارشناسان فضایی است. بدین منظور تَپ‌های الکترومغناطیسی را که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند، به طرف ماهوارهٔ موردنظر می‌فرستند و بازتاب آن توسط ایستگاه زمینی دریافت می‌شود. اگر زمان رفت و برگشت یک تپ ۰/۲۴ ثانیه باشد، فاصلهٔ ماهواره از ایستگاه زمینی، تقریباً چقدر است؟

۱ــ۳ حرکت با شتاب ثابت

۱۸. نمودار vــt متحرکی که در امتداد محور x حرکت می‌کند مطابق شکل زیر است. سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی ۰/۰s تا ۵/۰s چند برابر سرعت متوسط آن در بازهٔ زمانی ۲۵/۰s تا ۴۰/۰s است؟



۱۹. شکل زیر نمودار مکان ــ زمان متحرکی را نشان می‌دهد که در امتداد محور x با شتاب ثابت در حرکت است.



الف) سرعت متوسط متحرک در بازهٔ زمانی صفر تا ۳/۰ ثانیه، چند متر بر ثانیه است؟

ب) معادلهٔ مکان ــ زمان متحرک را بنویسید.

پ) سرعت متحرک را در لحظهٔ t=۳/۰s پیدا کنید.

ت) نمودار سرعت ــ زمان متحرک را رسم کنید.

۲۰. متحرکی در امتداد محور x و با شتاب ثابت در حرکت است. در مکان x=+۱۰m سرعت متحرک +۴m/s و در مکان x=+۱۹m سرعت متحرک +۱۸km/h است.

الف) شتاب حرکت آن چقدر است؟

ب) پس از چه مدتی سرعت متحرک از +۴m/s به سرعت +۱۸km/h می‌رسد؟

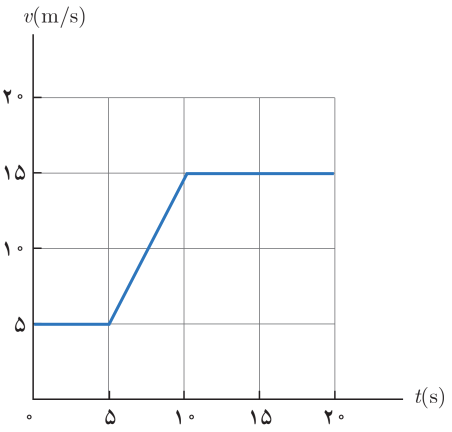
۲۱. خودرویی پشت چراغ قرمز ایستاده است. با سبز شدن چراغ، خودرو با شتاب ۲m/s² شروع به حرکت می‌کند. در همین لحظه، کامیونی با سرعت ثابت ۳۶km/h از آن سبقت می‌گیرد.

الف) در چه لحظه و در چه مکانی خودرو به کامیون می‌رسد؟

ب) نمودار مکان ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

پ) نمودار سرعت ــ زمان را برای خودرو و کامیون در یک دستگاه مختصات رسم کنید.

۲۲. شکل نشان داده شده نمودار سرعت ــ زمان خودرویی را نشان می‌دهد که روی مسیری مستقیم حرکت می‌کند.



الف) شتاب خودرو را در هر یک از لحظه‌های $t=۳s$ ، $t=۸s$ ، $t=۱۱s$ و $t=۱۵s$ به‌دست آورید.

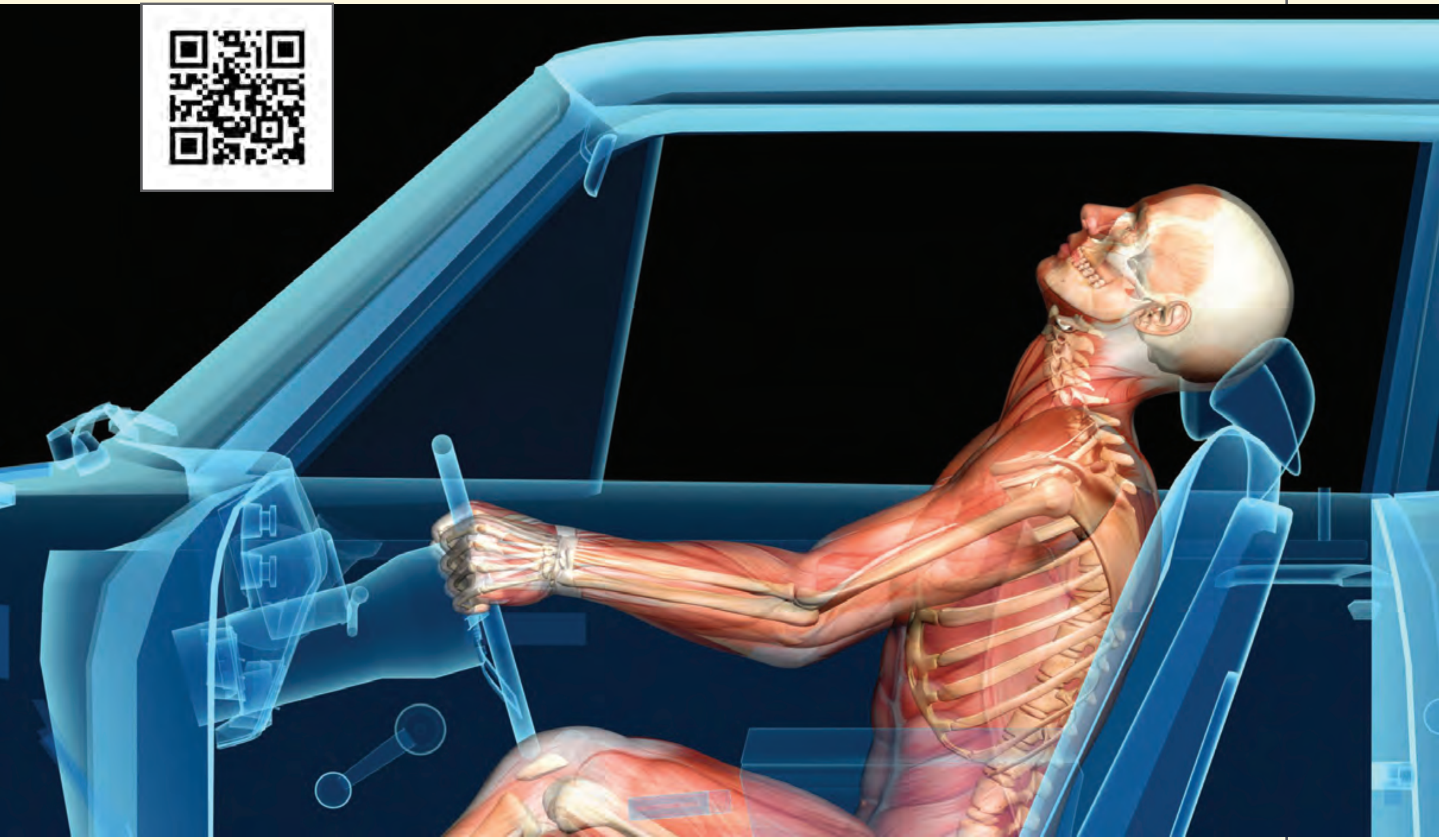
ب) شتاب متوسط در بازهٔ زمانی $t_۱=۰s$ تا $t_۲=۲۰s$ را به‌دست آورید.

پ) در هر یک از بازه‌های زمانی $t_۱=۵s$ تا $t_۲=۱۱s$ و $t_۲=۱۱s$ تا $t_۳=۲۰s$ خودرو چقدر جابه‌جا شده است؟

ت) سرعت متوسط خودرو در بازه‌های $t_۱=۵s$ تا $t_۲=۱۱s$ و $t_۲=۱۱s$ تا $t_۳=۲۰s$ را به‌دست آورید.

فصل ۲

دینامیک



بخش‌ها

وقتی در یک تصادف، به خودرو از پشت ضربۀ شدیدی وارد شود، به‌دلیل تفاوتی که در حرکت تنه و سر راننده رخ می‌دهد، به گردن راننده آسیبی وارد می‌شود که به آن آسیب تازیانه‌ای (whiplash injury) می‌گویند. در نبود ضربه‌گیر گردن ممکن است این آسیب جدی و جبران‌ناپذیر باشد. به کمک مفاهیم نیرو می‌توان دلیل این آسیب را توضیح داد.

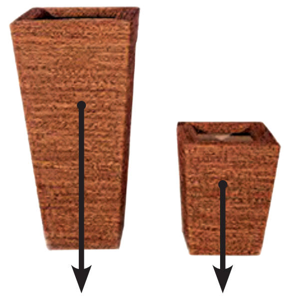


شکل ۲ـ۱ هنگام وارد کردن نیرو به توپ، باید جهت و اندازهٔ نیروی وارد بر توپ به گونه‌ای باشد که توپ به مکان مناسب و موردنظر بازیکنان برخورد کند.

در تمام فعالیت‌های روزانه با نیرو سروکار داریم. راه رفتن، باز و بسته کردن در و پنجره، نوشتن، کار با گوشی همراه، شنا کردن و دوچرخه‌سواری نمونه‌هایی از این دست هستند و همچنین حرکت قطار، هواپیما، خودرو و... بدون اعمال نیرو انجام نمی‌شوند.

در فصل اول با کمیت‌های مکان، تندی، سرعت و شتاب آشنا شدیم و حرکت یک جسم را به کمک آنها توصیف کردیم اما از علت انواع حرکت، پرسشی مطرح نشد، مثلاً در چه صورت حرکت جسم با سرعت ثابت است؟ در چه صورت جسم دارای حرکت با شتاب ثابت روی خط راست است؟ در چه صورت جسم ساکن می‌ماند؟ و... .

وقتی جسمی را می‌کشیم یا آن را هل می‌دهیم، به آن نیرو وارد می‌کنیم. نیرو، حاصل برهم‌کنش یا اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است. نیرو کمیتی برداری است که علاوه بر اندازه، جهت نیز دارد (شکل ۲ــ۱). معمولاً نیرو را با $\vec{F}$ نشان می‌دهند[1]. در رسم نیرو از یک پاره‌خط جهت‌دار با مقیاس مناسب استفاده می‌شود؛ مثلاً در شکل ۲ــ۲، بردار وزن دو گلدان را مشاهده می‌کنید که با مقیاس مناسب رسم شده‌اند.



شکل ۲ـ۲ گاهی برای سادگی فرض می‌شود که همهٔ جرم یک جسم در یک نقطه به نام مرکز جرم جسم متمرکز شده است و به‌جای آنکه نیرو به قسمت‌های مختلف جسم وارد شود به این نقطه وارد می‌شود.

نیرو را به کمک نیروسنج اندازه‌گیری می‌کنیم و یکای آن، نیوتون است که با نماد N نشان داده می‌شود. اثر نیرو بر یک جسم به شکل‌های مختلف مانند شروع به حرکت کردن، توقف، کم و زیاد شدن اندازهٔ سرعت (تندی)، تغییر جهت سرعت و تغییر شکل آن جسم، خود را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه در مورد سرعت فراگرفتیم، می‌توان به‌طور خلاصه نشان داد که نیروی وارد بر یک جسم می‌تواند سبب تغییر سرعت جسم یا تغییر شکل آن شود.

به‌طور کلی در این فصل می‌خواهیم دربارهٔ نیروها، که نقش اساسی در تغییر سرعت یک جسم یا تغییر شکل جسم دارند و قوانین حرکت بحث کنیم. در کتاب علوم نهم با مفهوم نیرو و قوانین نیوتون دربارهٔ حرکت آشنا شدیم. در اینجا ضمن مرور و یادآوری آنها، مفاهیم فراگرفته شده را گسترش می‌دهیم تا توانایی و درک شما در رابطه با مفهوم نیرو، عمق بیشتری پیدا کند و بتوانید براساس نیروهای وارد شده به یک جسم، حرکت آن را بررسی و تحلیل کنید.

۲ــ۱ قوانین حرکت نیوتون

ایزاک نیوتون (۱۷۲۷ــ۱۶۴۳م.) نخستین کسی بود که به رابطهٔ میان نیرو و شتاب پی برد. این رابطه همراه با دیگر قانون‌های نیوتون، اساس مکانیک نیوتونی را تشکیل می‌دهند. در این بخش به بررسی سه قانون اصلی حرکت می‌پردازیم.

قانون اول نیوتون: در علوم نهم دیدیم که اگر به جسمی به‌طور هم‌زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برایند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند.

۱ــ F سرواژهٔ انگلیسی Force به معنای نیرو است.

پرسش ۲ـ۱

در شکل روبه‌رو یک کشتی در حال حرکت را می‌بینید که نیروهای وارد بر آن متوازن‌اند. کدام نیروها اثر یکدیگر را خنثی کرده‌اند؟



قبل از سال ۱۶۰۰ میلادی دیدگاه رایج این بود که هر جسمِ در حال حرکتی برای ادامهٔ حرکت حتماً نیاز به نیرو دارد، ولی گالیله با طراحی آزمایش‌هایی ذهنی نتیجه گرفت که در نبود نیرو، حرکت جسم متحرک ادامه می‌یابد. نیوتون نظر گالیله را به‌صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد : «یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

پرسش ۲ـ۲

در فیلمی علمی ــ تخیلی، موتور یک کشتی فضایی که در فضای تهی خارج از جو زمین و دور از هر سیاره و خورشید در حرکت است، از کار می‌افتد. در نتیجه حرکت کشتی فضایی کُند می‌شود و می‌ایستد. آیا امکان وقوع چنین رویدادی وجود دارد؟ توضیح دهید.

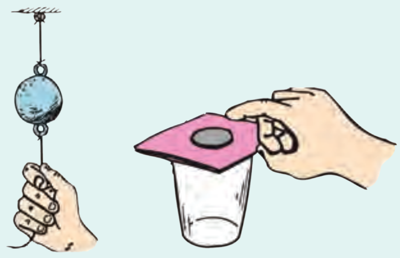
فعالیت ۲ـ۱

دربارهٔ آزمایش ذهنی گالیله تحقیق کنید و به کلاس گزارش دهید.

فرض کنید در اتوبوسی نشسته‌اید و اتوبوس در یک جادهٔ مستقیم حرکت می‌کند. اگر راننده ترمز کند و شما کمربند خود را نبسته باشید، ممکن است به جلو پرتاب شوید (متمایل شوید)، یا اگر اتوبوس ساکن باشد و ناگهان شروع به حرکت کند، به طرف عقب به صندلی خود فشرده می‌شوید. آیا علت آن را می‌دانید؟ بر اساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت به حرکت خود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، لَختی[۱] گویند.

۱ــ Inertia

پرسش ۲ـ۳



(ب) (الف)

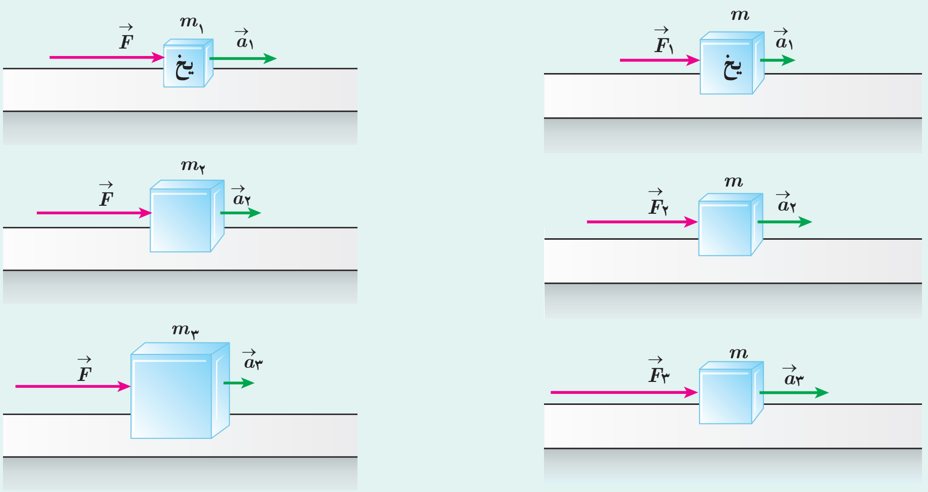
الف) چرا حرکت سریع مقوا در شکل الف، سبب افتادن سکه در لیوان می‌شود؟

ب) چرا در شکل ب، اگر به‌آرامی نیروی وارد بر گوی سنگین را زیاد کنیم نخ بالای گوی پاره می‌شود، اما اگر ناگهان نخ را بکشیم، نخ پایین آن پاره می‌شود؟

قانون دوم نیوتون : قانون اول نیوتون به بررسی حرکت جسمی می‌پردازد که نیروی خالص وارد بر آن صفر است. حال اگر نیروهای وارد بر جسم متوازن نباشند، یعنی نیروی خالصی بر جسم وارد شود، برای حرکت جسم چه اتفاقی می‌افتد؟ قانون دوم نیوتون به این پرسش پاسخ می‌دهد. همان‌طور که در علوم نهم دیدیم وقتی نیروی خالصی به جسمی وارد می‌شود، سرعت آن تغییر می‌کند و جسم تحت تأثیر آن نیرو، شتابی در جهت نیروی خالص پیدا می‌کند.

پرسش ۲ـ۴

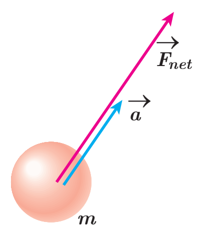
در شکل‌های زیر، قطعه‌یخ‌ها روی یک سطح افقی بدون اصطکاک قرار دارند. تفسیر خود را از این شکل‌ها بیان کنید.



مشاهدات مختلف نشان می‌دهد هر چه نیروی خالص وارد بر جسم بزرگ‌تر باشد شتابی که جسم می‌گیرد نیز بیشتر خواهد بود. جرم جسم نیز روی شتابی که این جسم می‌گیرد مؤثر است. با یک نیروی خالص معیّن، هر چه جرم جسم بیشتر باشد، شتاب آن کمتر است. یعنی شتاب با جرم نسبت وارون دارد.

چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند :

هرگاه بر جسم نیروی خالصی وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد که این شتاب با نیروی خالص وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و در همان جهت نیروی خالص است و با جرم جسم



شکل ۲ـ۳ شتاب جسم ($\vec{a}$) در جهت نیروی خالص وارد بر آن ($\vec{F}_{net}$) است.

نسبت وارون دارد.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$

و یا

(۲ــ۱) (قانون دوم نیوتون) $\vec{F}_{net} = m\vec{a}$

یکای SI نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی[1] است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

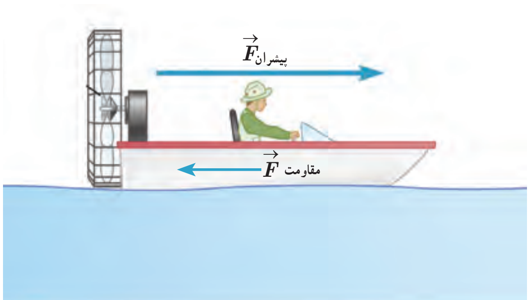
توجه: در رابطهٔ ۲ــ۱، $m\vec{a}$ نیرو نیست. تمام نیروهای وارد بر یک جسم با هم جمع برداری می‌شوند تا نیروی خالص ($\vec{F}_{net}$) وارد بر جسم به‌دست آید و آن را در سمت چپ معادله قرار می‌دهند. این نیروی خالص مساوی با حاصل‌ضرب جرم در شتاب ($m\vec{a}$) است.

مثال ۲ــ۱

نیروی موتور یک قایق موتوری که جرم آن با سرنشینش ۴۰۰kg است، به گونه‌ای تنظیم می‌شود که در بازهٔ زمانی معینی، همواره نیروی افقی خالص ۸۰۰N به طرف جلو بر قایق وارد می‌شود.

الف) شتاب این قایق چقدر و در چه جهتی است؟

ب) اگر نیروی پیشران در یک لحظه ۱۳۰۰N باشد، نیروی مقاومت در آن لحظه چقدر است؟



پ) چقدر طول می‌کشد تا سرعت قایق از حالت سکون به ۱۵/۰ m/s برسد؟ در این مدت قایق چقدر جابه‌جا می‌شود؟

پاسخ: الف) از قانون دوم نیوتون برای پیدا کردن شتاب قایق استفاده می‌کنیم. قایق در یک مسیر مستقیم حرکت می‌کند، می‌توان رابطهٔ ۲ــ۱ را برای یک راستا به‌صورت $a = \frac{F_{net}}{m}$ نوشت:

$$a = \frac{F_{net}}{m} = \frac{۸۰۰\text{N}}{۴۰۰\text{kg}} = ۲/۰۰\text{N/kg} = ۲/۰۰\text{m/s}^۲$$

با توجه به اینکه جهت شتاب همواره در جهت نیروی خالص است، شتاب قایق به طرف جلو خواهد بود.

ب) نیروی پیشران و مقاومت در یک راستا هستند، بنابراین می‌توانیم بنویسیم:

$$F_{net} = F_{پیشران} - F_{مقاومت} \Rightarrow ۸۰۰\text{N} = ۱۳۰۰\text{N} - F_{مقاومت}$$

$$F_{مقاومت} = ۵۰۰\text{N}$$

پ) از رابطهٔ سرعت ــ زمان و سرعت ــ جابه‌جایی در حرکت با شتاب ثابت استفاده می‌کنیم.

$$v = at + v_۰ \Rightarrow ۱۵/۰\ \text{m/s} = (۲/۰۰\text{m/s}^۲)t + ۰\text{m/s} \Rightarrow t = ۷/۵\text{s}$$

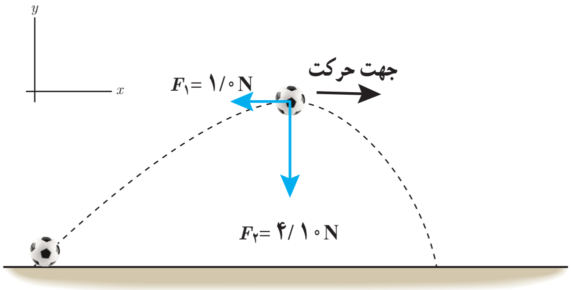
$$v^۲ = v_۰^۲ + ۲a\Delta x \Rightarrow \Delta x = \frac{v^۲ - v_۰^۲}{۲a} = \frac{(۱۵/۰\text{m/s})^۲ - (۰/۰\text{m/s})^۲}{۲(۲/۰۰\text{m/s}^۲)} = ۵۶/۳\text{m}$$

به این ترتیب با داشتن نیروی خالص می‌توانیم کمیت‌های شتاب، سرعت، زمان حرکت، مکان و جابه‌جایی را به‌دست آوریم.

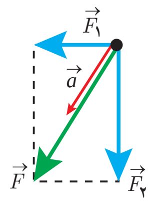
۱ــ واژهٔ *net* در زبان انگلیسی به معنای خالص است.

مثال ۲ــ۲

شکل روبه‌رو نیروهای وارد بر توپ فوتبالی به جرم $420\,g$ را در بالاترین نقطهٔ مسیرش نشان می‌دهد که در آن $\vec{F}_1$ نیروی مقاومت هوا و $\vec{F}_2$ وزن توپ است. جهت و بزرگی شتاب توپ در این نقطه را تعیین کنید[1]. از نیروهای دیگر وارد بر توپ صرف‌نظر می‌شود.



پاسخ : جهت شتاب در جهت نیروی خالص (برایند) است.



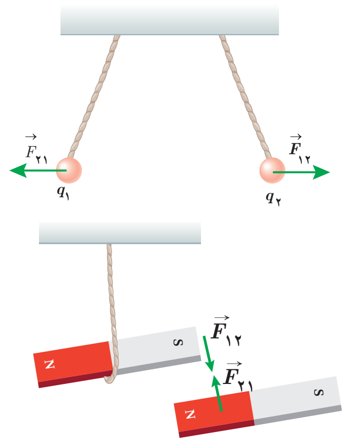
$$\vec{F}_2 = (-4/10\,N)\,\vec{j} \quad و \quad \vec{F}_1 = (-1/0\,N)\,\vec{i}$$

$$\text{نیروی خالص} = \vec{F}_{net} = \text{وزن} + \text{نیروی مقاومت هوا} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = (-1/0\,N)\,\vec{i} + (-4/10\,N)\,\vec{j}$$

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} = \frac{(-1/0\,N)\,\vec{i} + (-4/10\,N)\,\vec{j}}{420 \times 10^{-3}\,kg} = (-2/4\,N/kg)\,\vec{i} + (-9/8\,N/kg)\,\vec{j}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(-2/4\,N/kg)^2 + (-9/8\,N/kg)^2} = 10\,N/kg = 10\,m/s^2$$

قانون سوم نیوتون : وقتی فنری را می‌کشید، فنر نیز شما را می‌کشد. در برخورد راکت با توپ تنیس، راکت به توپ نیرو وارد می‌کند و توپ نیز به راکت نیرو وارد می‌کند. اگر شما دیوار را هل دهید. دیوار نیز شما را هل می‌دهد. دو بار الکتریکی بدون آنکه با هم تماس داشته باشند به هم نیروی الکتریکی وارد می‌کنند. همچنین دو قطب آهن‌ربا بدون تماس با یکدیگر به هم نیروی مغناطیسی وارد می‌کنند (شکل ۲ــ۴). در این مثال‌ها نیرو اثر متقابل دو جسم بر یکدیگر است.



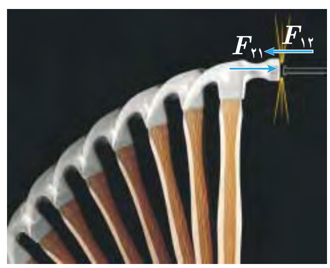
شکل ۲ــ۴ نیروهای کنش و واکنش هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

نیروها همواره به‌صورت جفت وجود دارند. اگر یکی از این نیروها را کنش بنامیم، نیروی دیگر واکنش نامیده می‌شود. قانون سوم نیوتون رابطهٔ کمّی بین نیروهای کنش و واکنش را به‌صورت زیر بیان می‌کند :

هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

بر اساس قانون سوم نیوتون، در تمام مثال‌های بالا، هر دو نیرو هم‌اندازه و هم‌راستا ولی در خلاف جهت یکدیگرند و می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \Rightarrow F_{12} = F_{21} \qquad \text{(قانون سوم نیوتون)} \qquad (2\text{ــ}2)$$



شکل ۲ــ۵ چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و میخ به چکش. این نیروها هم‌اندازه، هم‌راستا و در خلاف جهت یکدیگرند.

توجه داریم ممکن است نیروهای کنش و واکنش منجر به اثرات متفاوتی شود؛ مثلاً هنگام کوبیدن میخ در قطعه‌ای چوب، چکش به میخ نیرو وارد می‌کند و سبب فرورفتن میخ در چوب می‌شود. نیروی وارد از میخ به چکش حرکت چکش را کُند و متوقف می‌کند (شکل ۲ــ۵).

توجه کنید که نیروهای کنش و واکنش همواره به دو جسم وارد می‌شوند و هم‌نوع‌اند؛ مثلاً هر دو الکتریکی‌اند، یا هر دو مغناطیسی‌اند یا هر دو گرانشی‌اند و یا . . . .

[1] ــ بررسی حالت‌هایی که نیروها هم‌راستا یا عمود بر هم نیستند خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

مثال ۲ـ۳

دو شخص به جرم‌های ۷۵/۰kg و ۵۰/۰kg با کفش‌های چرخ‌دار در یک سالن مسطح و صاف روبه‌روی هم ایستاده‌اند. شخص اول با نیروی ۱۰۰/۰N شخص دوم را به طرف راست هُل می‌دهد.

الف) شتابی که شخص دوم می‌گیرد چقدر است؟

ب) شتابی که شخص اول می‌گیرد چقدر است؟



پاسخ : از قانون سوم نیوتون می‌دانیم نیرویی که شخص اول به دوم وارد می‌کند $(\vec{F}_{۱۲})$ هم‌اندازه و در خلاف جهت نیرویی است که شخص دوم به اول وارد می‌کند $(\vec{F}_{۲۱})$. با انتخاب جهت مثبت محور x به طرف راست می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{F}_{۲۱} = -\vec{F}_{۱۲} \Rightarrow F_{۲۱} = F_{۱۲} = ۱۰۰/۰\text{N}$$

$$\vec{a}_{۲} = \frac{\vec{F}_{۱۲}}{m} = \frac{(۱۰۰/۰\text{N})\,\vec{i}}{۵۰/۰\text{kg}} = (۲/۰۰\frac{\text{N}}{\text{kg}})\,\vec{i} = (۲/۰۰\text{m/s}^۲)\,\vec{i}$$

$$\vec{a}_{۱} = \frac{\vec{F}_{۲۱}}{m} = \frac{-(۱۰۰/۰\text{N})\,\vec{i}}{۷۵/۰\text{kg}} = -(۱/۳۳\frac{\text{N}}{\text{kg}})\,\vec{i} = -(۱/۳۳\text{m/s}^۲)\,\vec{i}$$

توجه کنید نیروهای وارد بر هر دو نفر هم‌اندازه بوده است، اما به علت متفاوت بودن جرم‌ها، شتاب‌ها متفاوت شده است.

پرسش ۲ـ۵

شخصی در حال هل دادن جعبه‌ای سنگین روی سطح افقی است و این جعبه در جهت این نیرو حرکت می‌کند. با توجه به آنکه نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند با نیرویی که جعبه به شخص وارد می‌کند هم‌اندازه است، توضیح دهید چگونه جعبه حرکت می‌کند؟

۲ـ۲ معرفی برخی از نیروهای خاص

بنا به قانون دوم نیوتون $(\vec{F}_{net} = m\vec{a})$ برای بررسی حرکت یک جسم باید نیروهای وارد بر آن جسم را تعیین کنیم. به همین دلیل لازم است با انواع نیروها آشنا شویم. در این بخش تعدادی از نیروهایی را که با آنها بیشتر سروکار داریم، معرفی می‌کنیم.

وزن : همان‌طور که در علوم هفتم خواندیم وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود (شکل ۲ـ۶). وقتی جسمی را در نزدیکی سطح زمین رها می‌کنیم، وزن آن سبب می‌شود تا جسم به طرف زمین شتاب پیدا کند. اگر از نیروی مقاومت هوا در مقابل حرکت چشم‌پوشی شود، طبق قانون دوم نیوتون می‌توانیم بنویسیم :

شتاب × جرم جسم = وزن جسم

اگر جرم جسم را با m، شتاب گرانشی را با $\vec{g}$ و وزن را با $\vec{W}$ نشان دهیم، رابطهٔ بالا به شکل زیر درمی‌آید :

$$\vec{W} = m\vec{g} \qquad \text{(وزن جسم)} \qquad (۲\text{ـ}۳)$$



شکل ۲ـ۶ زمین بر جسم نیروی گرانشی $(\vec{W})$ وارد می‌کند و جسم نیز بر زمین نیروی گرانشی $(\vec{W}')$ وارد می‌کند.

توجه داریم که جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن طبق رابطهٔ ۲ــ۳ به مقدار $\vec{g}$ در آن مکان بستگی دارد. مثلاً اگر جرم شخصی $۶۰/۰\,kg$ باشد، در محلی که $g=۹/۸۰\,N/kg$ است، وزن آن $۵۸۸N$ و در بالونی که در ارتفاع زیاد حرکت می‌کند و در آن ارتفاع $g=۹/۷۶N/kg$ است تقریباً $۵۸۶N$ است. شتاب جاذبه در سطح زمین تقریباً $۹/۸N/kg$ است.

تمرین ۲ــ۱

الف) وزن قطعه‌ای طلا به جرم ۱۰۰ گرم را روی سطح زمین به‌دست آورید.

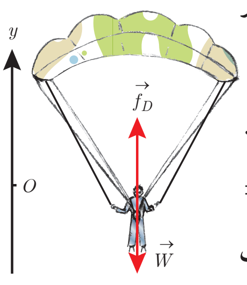
ب) وزن یک جسم در سطح یک سیاره برابر با نیروی گرانشی است که از طرف آن سیاره بر جسم وارد می‌شود. وزن این قطعه طلا را در سطح ماه و مریخ به‌دست آورید و با هم مقایسه کنید. $(g_{\text{مریخ}}=۳/۷N/kg\ ,\ g_{\text{ماه}}=۱/۶N/kg\ ,\ g_{\text{زمین}}=۹/۸N/kg)$

توجه کنید، حتی اگر جسم در حال سقوط آزاد نباشد باز هم نیروی وزن ($\vec{W}$) بر آن وارد می‌شود. مثلاً بر یک چترباز قبل از پرش، در حال سقوط و حتی هنگام رسیدن به زمین، نیروی وزن وارد شده و از رابطهٔ ۲ــ۳ به‌دست می‌آید.

نیروی مقاومت شاره : وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه‌بر وزن جسم، نیروی دیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به‌طور کلی وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن نیروی مقاومت شاره می‌گویند[1] و معمولاً آن را با $\vec{f}_D$ نشان می‌دهند[2]. نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و... بستگی دارد. هرچه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، نیروی مقاومت هوا می‌گویند.

مثال ۲ــ۴

چتربازی به جرم $۶۰/۰\,kg$ مدتی پس از یک پرش آزاد، چترش را باز می‌کند. ناگهان نیروی مقاومت هوا به $۱۱۴۰\,N$ افزایش می‌یابد. شتاب چترباز را در این لحظه به‌دست آورید و حرکت آن را تحلیل کنید. برای سادگی g را $۱۰\,N/kg$ فرض کنید.



پاسخ : با توجه به شکل، نیروی وزن به طرف پایین و مقاومت هوا به طرف بالا است. اگر محور مختصات را رو به بالا انتخاب کنیم، برای محاسبهٔ شتاب چترباز در این حالت می‌توانیم بنویسیم :

$$f_D - W = ma \Rightarrow (۱۱۴۰N) - (۶۰/۰kg)(۱۰\frac{N}{kg}) = (۶۰/۰kg)a$$

$$\Rightarrow a = \frac{۵۴۰N}{۶۰/۰kg} = ۹/۰m/s^۲$$

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید شتاب چترباز در این حالت $۹/۰m/s^۲$ و رو به بالا، یعنی در خلاف جهت حرکت آن است. پس به‌تدریج تندی چترباز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه نیروی مقاومت هوا نیز

۱ــ توجه کنید، نیروی مقاومت شاره با نیروی شناوری که از سال دهم با آن آشنا هستید، متفاوت است.

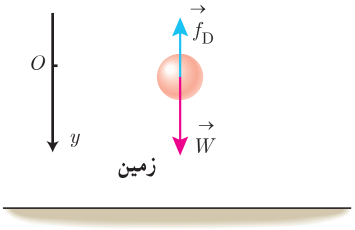
۲ــ D سرواژهٔ Drag به معنای پسا (پس‌کشی) است.

کم می‌شود تا اینکه نیروی مقاومت هوا و وزن هم‌اندازه شده و نیروهای وارد بر چترباز متوازن شوند. پس از این چترباز با تندی ثابتی موسوم به تندی حدی، به طرف پایین حرکت می‌کند. تندی حدی برای یک چترباز نوعی حدود ۵/۰m/s و برای قطرات باران حدود ۷/۰m/s است.

مثال ۲ــ۵

دو گوی هم‌اندازه را که جرم یکی دو برابر دیگری است ($m_۲ = ۲m_۱$) از بالای برجی به ارتفاع h به‌طور هم‌زمان رها می‌کنیم. با فرض اینکه نیروی مقاومت هوا در طی حرکت دو گوی ثابت و یکسان باشد، تندی برخورد کدام گوی با زمین بیشتر است؟

پاسخ : بر این گوی‌ها، دو نیروی وزن و مقاومت هوا وارد می‌شود. طبق قانون دوم نیوتون، نیروی خالص وارد بر گوی برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است. نیروی مقاومت هوا را با f_D و وزن را با W نشان می‌دهیم و برای بررسی ساده‌تر حرکت گوی‌ها، جهت مثبت محور y را به‌طرف پایین انتخاب می‌کنیم :



$$W - f_D = ma \Rightarrow a = \frac{W - f_D}{m} = \frac{mg - f_D}{m} = g - \frac{f_D}{m}$$

یعنی با درنظرگرفتن مقاومت هوا، هر چه m بیشتر باشد، شتاب حرکت بیشتر است.

در نتیجه $a_۲ > a_۱$ است.

طبق رابطهٔ سرعت ــ جابه‌جایی می‌توانیم بنویسیم :

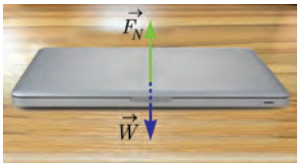
$$v^۲ - v_۰^۲ = ۲a\Delta y \Rightarrow v^۲ - ۰ = ۲ah \Rightarrow v = \sqrt{۲ah} \Rightarrow v_۲ > v_۱$$

یعنی در این مثال تندی برخورد گوی سنگین‌تر، بیشتر از گوی سبک‌تر است.

تمرین ۲ــ۲

اگر در مثال ۲ــ۵ از مقاومت هوا صرف‌نظر کنیم، سرعت برخورد گوی‌ها با زمین را با هم مقایسه کنید.

نیروی عمودی سطح : مطابق شکل ۲ــ۷، لپ‌تاپی را روی سطح افقی میزی در نظر بگیرید. بر لپ‌تاپ ساکن روی میز افقی چه نیروهایی وارد می‌شود؟ با توجه به اینکه نیروی وزن بر لپ‌تاپ وارد می‌شود، چه نیرویی سبب خنثی شدن آن و سکون جسم می‌شود؟



شکل ۲ ــ۷ نیروهای وارد بر لپ‌تاپ متوازن‌اند.

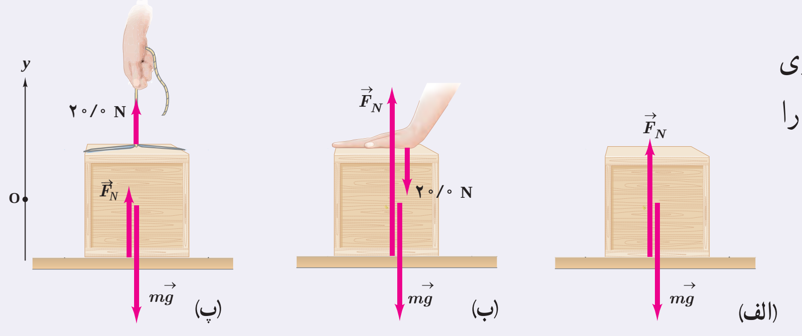
همان‌طور که می‌دانیم نیروهای وارد بر جسم ساکن، متوازن‌اند، بنابراین در این حالت باید یک نیروی هم‌اندازه و در خلاف جهت وزن از طرف میز (سطح) بر لپ‌تاپ وارد شده باشد تا نیروی وزن را خنثی کند. به این نیرو که عمود بر سطح تماس است، نیروی عمودی سطح (تکیه‌گاه) می‌گویند و آن را با $\vec{F}_N$ نشان می‌دهند.

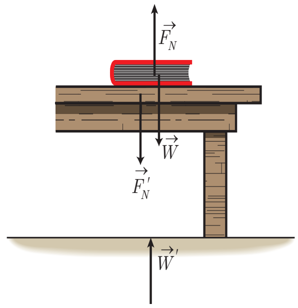
$$\vec{F}_{net} = ۰ \Rightarrow \vec{F}_N + \vec{W} = ۰ \rightarrow \vec{F}_N = -\vec{W} \Rightarrow F_N = W$$

نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است. اگر جسمی سنگین را روی یک سطح اسفنجی یا یک تشک قرار دهیم تغییر شکل اسفنج یا تشک به‌خوبی دیده می‌شود. حتی یک زمین به‌ظاهر سفت و سخت نیز وقتی جسمی روی آن قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل مربوط به نیروهای بین مولکولی است که در فیزیک ۱ با آن آشنا شدید.

تمرین ۲ـ۳

همانند شکل، جعبه‌ای به جرم ۴/۰kg روی میزی افقی قرار دارد. نیروی عمودی سطح را در حالت‌های نشان داده شده به‌دست آورید.



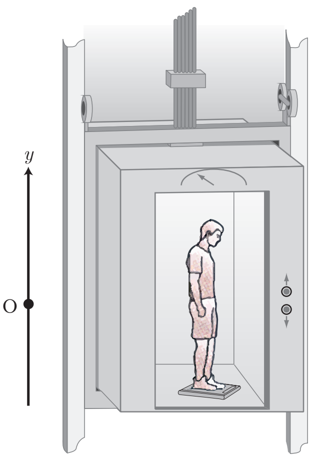


نیروی عمودی تکیه‌گاه از طرف سطح به جسمی که روی آن قرار دارد وارد می‌شود، بنابراین واکنش این نیرو $\vec{F}'_N$ به‌صورت عمودی و در خلاف جهت $\vec{F}_N$ از طرف جسم به سطح وارد می‌شود (شکل ۲ـ۸). همچنین واکنش نیروی وزن $(\vec{W}')$ نیرویی است که از طرف جسم به زمین و در خلاف جهت $\vec{W}$ وارد می‌شود.

شکل ۲ ـ ۸ بر جسم نیروی عمودی سطح $(\vec{F}_N)$ و وزن $(\vec{W})$ وارد می‌شود.

مثال ۲ـ۶

شخصی درون آسانسوری ساکن، روی یک ترازوی فنری ایستاده است. در این حالت ترازو عدد ۵۸۸N را نشان می‌دهد. الف) جرم شخص چند کیلوگرم است؟ ب) وقتی آسانسور شتاب رو به بالای $۲/۰۰ m/s^2$ دارد، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ پ) وقتی آسانسور شتاب رو به پایین $۲/۰۰ m/s^2$ دارد ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ ت) اگر کابل آسانسور پاره شود و آسانسور سقوط آزاد کند، ترازو چه عددی را نشان می‌دهد؟ $(g = ۹/۸۰ N/kg)$



پاسخ : بر شخص نیروی وزن به طرف پایین و نیروی عمودی سطح به طرف بالا وارد می‌شود. جهت مثبت محور y را رو به بالا انتخاب می‌کنیم و از قانون دوم نیوتون برای پاسخ به قسمت‌های مختلف استفاده می‌کنیم.

الف) در حالتی که آسانسور ساکن است می‌توانیم بنویسیم :

$$F_N - W = ma = ۰ \Rightarrow F_N = W = mg$$

توجه داریم نیروسنج نیروی وارد بر خودش یعنی F'_N که واکنش F_N است را نشان می‌دهد. پس نیروسنج اندازهٔ F_N را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

$$F'_N = ۵۸۸N \Rightarrow F_N = F'_N = ۵۸۸\,N\ ,\ F_N = W = mg \Rightarrow ۵۸۸\,N = m\,(۹/۸۰ N/kg) \Rightarrow m = ۶۰/۰ kg$$

ب)

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = (۶۰/۰kg)(۹/۸۰\ N/kg) + (۶۰/۰kg)(۲/۰۰ N/kg)$$

$$F_N = ۷۰۸N$$

یعنی در این حالت، ترازو عددی بزرگ‌تر از اندازهٔ وزن را نشان می‌دهد.

پ)

$$F_N - W = ma \Longrightarrow F_N - mg = ma \Longrightarrow F_N = mg + ma = m\,(g+a)$$

جهت شتاب رو به پایین است.

$$F_N = (۶۰/۰\text{kg})\,(۹/۸۰\frac{\text{N}}{\text{kg}} - ۲/۰۰\frac{\text{N}}{\text{kg}}) = ۴۶۸\text{N}$$

یعنی در این حالت ترازو، عددی کوچک‌تر از اندازهٔ وزن را نشان می‌دهد.

ت) وقتی کابل آسانسور پاره شود، آسانسور سقوط آزاد می‌کند و اندازهٔ شتاب آن برابر g و شتاب رو به پایین است.

$$F_N - W = ma \rightarrow F_N = mg + ma = m(g-g) = ۰$$

یعنی در سقوط آزاد، نیروی عمودی سطح صفر است. به عبارت دیگر ترازو عدد صفر را نشان می‌دهد.

پرسش ۲ـ۶

در مثال ۲ـ۶، در هر یک از حالت‌های زیر، عددی را که ترازوی فنری نشان می‌دهد با وزن شخص مقایسه کنید.

الف) آسانسور به طرف بالا شروع به حرکت کند.

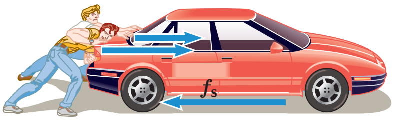
ب) آسانسور به طرف پایین شروع به حرکت کند.

پ) آسانسور در حالی که به طرف بالا حرکت می‌کند، متوقف شود.

ت) آسانسور در حالی که به طرف پایین حرکت می‌کند، متوقف شود.

نیروی اصطکاک: وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن نیروی اصطکاک گویند.

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را (که در وضعیت پارک است) هُل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیرویی در خلاف جهت هُل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند (شکل ۲ـ۹). این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک ایستایی است و آن را با f_s نشان می‌دهند. حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از نیروی اصطکاک جنبشی است و آن را با f_k نشان می‌دهند.



شکل ۲ـ۹ نیروی اصطکاک ایستایی در خلاف جهت هل دادن به‌وجود آمده است.

نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، و زبری و نرمی آنها و... بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زیرهٔ کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود (شکل ۲ـ۱۰). حتی سطوحی که بسیار هموار به‌نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

نیروی اصطکاک عمدتاً به‌عنوان نیروی اتلافی شناخته می‌شود، با وجود این در زندگی روزمره لازم است. نگه‌داشتن یک قلم در دست، نوشتن، راندن خودرو، قدم زدن و دویدن، ترمز کردن و... بدون اصطکاک ممکن نیست. بدون اصطکاک حتی ایستادن نامکن است، زیرا کمترین جابه‌جایی سبب لغزیدن و افتادن می‌شود.



شکل ۲ـ۱۰

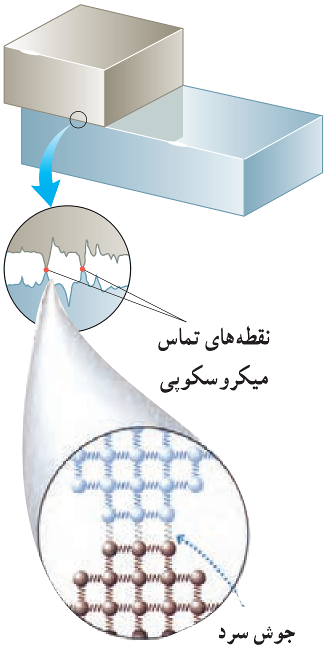
پرسش ۲ـ۷

الف) بر اساس قانون سوم نیوتون و آنچه از اصطکاک آموختید، توضیح دهید راه رفتن با شروع از حالت سکون چگونه انجام می‌شود؟

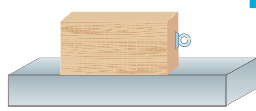
ب) چرا راه رفتن روی یک سطح سُر مانند سطح یخ به‌سختی ممکن است؟

خوب است بدانید

دیدگاه میکروسکوپی : در واقع، نیروی اصطکاک و نیروی عمودی سطح، جمع برداری نیروهای بی‌شماری است که طبیعت الکتریکی دارند و بین اتم‌های سطح یک جسم و اتم‌های سطح جسم دیگر عمل می‌کنند. اگر دو سطح فلزی کاملاً صیقل داده شده و تمیز روی هم گذاشته شوند، نمی‌توان به‌راحتی آنها را روی هم لغزاند. چون سطح آنها بسیار صاف است، بسیاری از اتم‌های یک سطح در تماس با بسیاری از اتم‌های سطح دیگراند و مطابق شکل انگار دو سطح با هم جوش خورده‌اند که اصطلاحاً به آن جوش سرد گویند. وقتی دو سطح معمولی روی هم قرار داده شوند، برخی نقاط با هم تماس پیدا می‌کنند. سطح میکروسکوپی تماس بسیار کوچک‌تر از سطح ماکروسکوپی ظاهری تماس است (حدود 10^4 بار کوچک‌تر). با وجود این بسیاری از نقاط تماس با یکدیگر جوش می‌خورند. این جوش‌ها وقتی یک نیرو بخواهد دو سطح را روی هم بلغزاند، اصطکاک ایستایی ایجاد می‌کنند. اگر نیروی وارد شده برای کشیدن یک سطح روی دیگری به حد کافی بزرگ باشد، نخست جوش‌ها جدا می‌شوند (در لحظهٔ شروع به حرکت) و پس از آن با شروع حرکت، جوش‌ها به‌طور پیوسته مجدداً تشکیل و سپس پاره می‌شوند.



جوش سرد بین اتم‌های سطح دو جسم هنگام حرکت یا هل دادن یا کشیدن جسم سبب اصطکاک می‌شود.

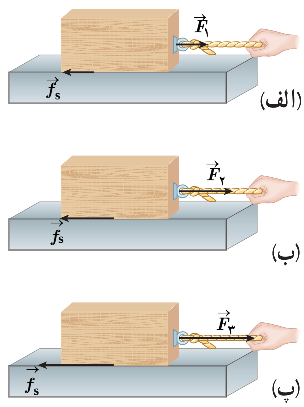

شکل ۲ـ۱۱ جسم ساکن روی سطح افقی

در ادامه نیروی اصطکاک را در دو حالت بررسی می‌کنیم :

الف) اصطکاک ایستایی : جسمی مطابق شکل ۲ـ۱۱ روی یک سطح افقی ساکن است. به این جسم نیروی وزن $(\vec{W})$ و نیروی عمودی سطح $(\vec{F_N})$ در راستای قائم وارد می‌شود. در ابتدا نیروی افقی $\vec{F_1}$ را به جسم وارد می‌کنیم به‌طوری که جسم ساکن بماند (شکل ۲ـ۱۲ الف)، چون جسم ساکن است بنا به قانون دوم نیوتون باید نیروی خالص وارد بر آن صفر باشد. بنابراین در راستای افقی داریم :

$$F_1 - f_s = ma = 0 \Rightarrow f_s = F_1$$

اکنون فرض کنید اندازهٔ نیروی $\vec{F_1}$ را افزایش داده و به اندازهٔ $\vec{F_2}$ رسانده‌ایم (شکل ۲ـ۱۲ ب). اگر جسم همچنان ساکن بماند، با استدلالی شبیه قبل نتیجه می‌گیریم که نیروی اصطکاک ایستایی افزایش یافته و برابر اندازهٔ $\vec{F_2}$ شده است. بنابراین با افزایش نیروی افقی، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش این نیرو به حالتی می‌رسیم که اگر اندازهٔ آن برابر $\vec{F_3}$ شود، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد (شکل ۲ـ۱۲ پ). به نیروی اصطکاک در این حالت **نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه** می‌گوییم. بزرگی نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه را با $f_{s,\max}$ نشان می‌دهیم $(f_{s,\max} = F_3)$. آزمایش نشان می‌دهد که بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی با اندازهٔ نیروی عمودی سطح (F_N) متناسب است.



شکل ۲ـ۱۲ با افزایش نیروی $\vec{F}$، نیروی اصطکاک ایستایی نیز افزایش می‌یابد تا اینکه به یک مقدار بیشینهٔ معیّن می‌رسد.

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N \qquad \text{(نیروی اصطکاک ایستایی بیشینه)} \qquad (۲\text{ـ}۴)$$

در این رابطه μ_s ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. تجربه و آزمایش نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و... بستگی دارد.

توجه کنید که رابطهٔ ۲ــ۴ اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی را فقط در آستانهٔ حرکت نشان می‌دهد.

در حالت کلی نیروی اصطکاک ایستایی کوچک‌تر و یا مساوی $f_{s,max}$ است :

$$f_s \le \mu_s F_N \qquad (۲\text{ـ}۵)$$

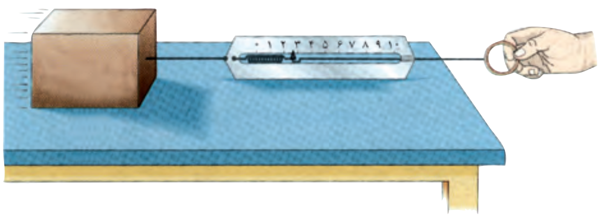
تمرین ۲ــ۴

اگر در شکل ۲ــ۱۲، جرم جسم ۴/۰kg و بزرگی نیروها F_1=۴/۰N ، F_2=۸/۰N و F_3=۱۶/۰N باشد،

الف) بزرگی نیروهای اصطکاک ایستایی در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی را پیدا کنید.

آزمایش ۲ــ۱: اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستایی بین دو جسم



وسایل لازم : نیروسنج، قطعهٔ چوبی به شکل مکعب مستطیل با وجوه یکنواخت، ترازو، خط‌کش

شرح آزمایش :

۱ــ مکعب چوبی را از طرف وجه بزرگ آن، روی سطح افقی میز قرار دهید.

۲ــ نیروسنج را مانند شکل به مکعب چوبی وصل کنید و سر دیگر نیروسنج را با دست بگیرید و به‌طور افقی بکشید.

۳ــ نیروی دستتان را به‌آرامی افزایش دهید تا جایی که مکعب چوبی در آستانهٔ لغزیدن قرار گیرد. در این حالت عددی را که نیروسنج نشان می‌دهد، در جدول یادداشت کنید (برای اینکه دقت شما افزایش یابد لازم است آزمایش را چند بار تکرار کنید).

۴ــ اکنون مکعب چوبی را از طرف وجه کوچک‌تر روی سطح قرار دهید و مراحل ۲ و ۳ را تکرار کنید.

۵ــ با اندازه‌گیری جرم مکعب چوبی و استفاده از رابطهٔ ۲ــ۴ مقدار μ_s را در هر آزمایش محاسبه و در جدول یادداشت کنید.

شمارهٔ آزمایش	مساحت سطح تماس قطعه با میز	وزن قطعه :	
		عددی که نیروسنج نشان می‌دهد ($f_{s,\max}$)	μ_s

همراه با اعضای گروه خود، نتیجه‌های به‌دست آمده را تفسیر کنید.


شکل ۲ــ۱۳ بر چوب‌های اسکی نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود.

جدول ۲ــ۱ برخی از ضریب‌های اصطکاک ایستایی و جنبشی

جنس دو سطح تماس	μ_k	μ_s
فولاد بر فولاد	۰/۵۷	۰/۷۴
فولاد بر آلومینیوم	۰/۴۷	۰/۶۱
فولاد بر مس	۰/۳۶	۰/۵۳
مس بر چدن	۰/۲۹	۱/۰۵
مس بر شیشه	۰/۵۳	۰/۶۸
شیشه بر شیشه	۰/۴۰	۰/۹۴
لاستیک بر بتون تر	۰/۲۵	۰/۳۰
لاستیک بر بتون خشک	۰/۸	۱/۰
تفلون بر تفلون	۰/۰۴	۰/۰۴

فعالیت ۲ــ۲

آزمایشی طراحی کنید که نشان دهد $f_{s,\max}$ متناسب با F_N است.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی : وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازهٔ نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازهٔ نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N \qquad \text{(نیروی اصطکاک جنبشی)} \qquad (۲ــ۶)$$

در این رابطه μ_k ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد.

تجربه و آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد. معمولاً ضریب اصطکاک جنبشی میان دو سطح، کمتر از ضریب اصطکاک ایستایی میان آن دو سطح است؛ یعنی $\mu_k < \mu_s$. جدول ۲ــ۱ تعدادی ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی را نشان می‌دهد.

فعالیت ۲ــ۳

آزمایشی طراحی کنید که با آن بتوانید :

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد بر جسمی مانند یک قطعه چوب در حال لغزش روی سطح را اندازه بگیرید و با استفاده از آن μ_k را به‌دست آورید.

ب) بستگی یا عدم بستگی نیروی اصطکاک جنبشی به مساحت سطح تماس دو جسم را تحقیق کنید.

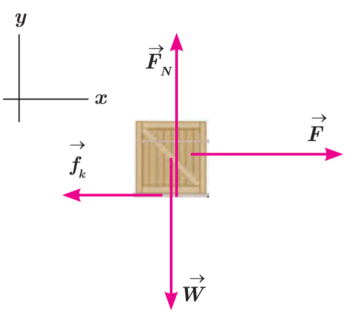
مثال ۲ــ۷

شکل مقابل شخصی را نشان می‌دهد که در حال کشیدن یک جعبهٔ ۷۵/۰ کیلوگرمی با نیروی ۳۰۹N روی سطح افقی است. نیرویی که شخص به جعبه وارد می‌کند افقی و جعبه در حال حرکت است. اگر ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جعبه ۰/۴۰۰ باشد،

الف) نیروی اصطکاک جنبشی وارد به جعبه چقدر است؟

ب) شتاب جعبه در این حالت چقدر است؟ ($g = ۹/۸۰ \text{N/kg}$)





پاسخ : الف) نیروهای وارد بر جعبه را رسم می‌کنیم. چون جسم در امتداد قائم شتاب ندارد از قانون دوم نیوتون نتیجه می‌شود که برایند نیروهای وارد بر جسم در راستای قائم صفر است.

$$F_N - W = ۰ \Rightarrow F_N = W = mg = (۷۵/۰\text{kg})(۹/۸۰\frac{\text{N}}{\text{kg}}) = ۷۳۵\text{N}$$

با استفاده از رابطهٔ ۲ــ ۶ داریم :

$$f_k = \mu_k F_N \Rightarrow f_k = ۰/۴۰۰ \times ۷۳۵\text{N} \Rightarrow f_k = ۲۹۴\text{N}$$

ب) برایند نیروهای افقی وارد بر جسم برابر با حاصل‌ضرب جرم در شتاب است.

$$F - f_k = ma \Rightarrow a = \frac{F - f_k}{m} \Rightarrow a = \frac{۳۰۹\,\text{N} - ۲۹۴\,\text{N}}{۷۵/۰\text{kg}} = ۰/۲۰ \text{m/s}^۲$$

تمرین ۲ــ۵

در مثال قبل اگر ضریب اصطکاک ایستایی بین جعبه و زمین ۰/۶۰۰ و جسم در ابتدا ساکن باشد، حداقل نیروی افقی لازم برای به‌حرکت درآوردن جعبه چقدر است؟

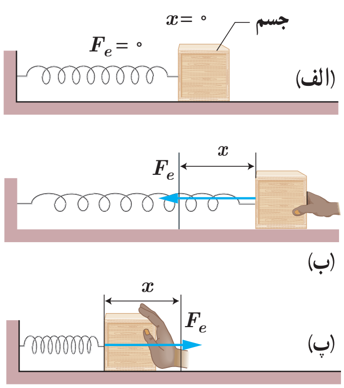
نیروی کشسانی فنر : همان‌طور که در فیزیک ۱ دیدیم فنرها اجزای مهمی در فناوری هستند و به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند (شکل ۲ــ ۱۴). همچنین با تأثیر نیرو بر یک فنر آشنا شدیم و می‌دانیم که اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲ــ ۱۵ الف، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر نه فشرده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازهٔ x بکشیم یا فشرده کنیم (شکل ۲ــ۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم (در محدودهٔ معینی از تغییر طول فنر)، نیروی کشسانی فنر نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۲ ــ۱۴ فنرهای به کار رفته در چرخ‌های خودرو

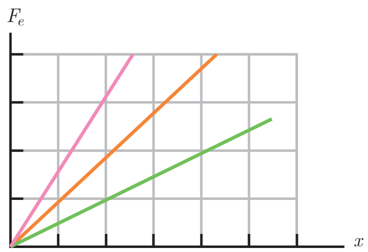
برای بیشتر فنرها با تقریب قابل قبولی، اندازهٔ نیروی کشسانی فنر با اندازهٔ تغییر طول آن (x) رابطهٔ مستقیم دارد :

$$F_e = kx \qquad \text{(اندازهٔ نیروی کشسانی فنر[1])} \qquad (۲\text{ــ}۷)$$



شکل ۲ ــ ۱۵ الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطهٔ تعادل است، ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند، و پ) فنر فشرده شده است، و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند.

ضریب k در رابطهٔ ۲ــ۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه، شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطهٔ ۲ــ۷ نیرو بر حسب نیوتون (N)، x بر حسب متر (m) و k بر حسب نیوتون بر متر (N/m) است. معادلهٔ ۲ــ۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلیسی (۱۷۰۳ــ۱۶۳۵م.) که این رابطه را کشف کرد، قانون هوک می‌نامند. برای یک فنر انعطاف‌پذیر، k عددی کوچک (حدود ۱۰۰ N/m) و برای یک فنر سفت k عددی بزرگ (حدود ۱۰۰۰۰ N/m) است. نمودار نیروی کشسانی بر حسب تغییر طول برای سه فنر با kهای متفاوت در شکل ۲ــ۱۶ رسم شده است.



شکل ۲ ــ۱۶ هرچه ثابت فنر بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

فعالیت ۲ــ۴

تعدادی فنر متفاوت تهیه کنید. الف) سختی آنها را مقایسه کنید. ب) با طراحی یک آزمایش، ثابت هر فنر را به‌دست آورید.

۱ــ زیرنویس e در نماد نیروی کشسانی فنر (F_e) سرواژهٔ elastic به معنی کشسان است.

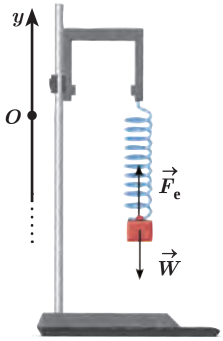
مثال ۲ـ۸

فنری به طول $L_\circ = ۱۰/۰\,cm$ را از یک نقطه آویزان می‌کنیم و به سر دیگر آن وزنهٔ ۲۰۰ گرمی وصل می‌کنیم. پس از رسیدن به تعادل، طول فنر به $L=۱۲/۰\,cm$ می‌رسد.

الف) ثابت فنر چند نیوتون بر متر است؟

ب) اگر وزنه‌ای ۳۰۰ گرمی را به فنر وصل کنیم، پس از رسیدن به تعادل طول فنر چند سانتی‌متر می‌شود؟

پاسخ : الف) محور مختصات را همانند شکل انتخاب می‌کنیم و نیروهای وارد بر جسم را رسم و با استفاده از قانون دوم نیوتون مسئله را حل می‌کنیم.



$$F_e - W = ma \Rightarrow F_e - W = ۰ \text{ و } F_e = kx \Rightarrow kx = mg$$

$$k(۱۲/۰\times۱۰^{-۲}m - ۱۰/۰\times۱۰^{-۲}m) = (۲۰۰\times۱۰^{-۳}kg)(۹/۸\,N/kg)$$

$$k = ۹۸\,N/m$$

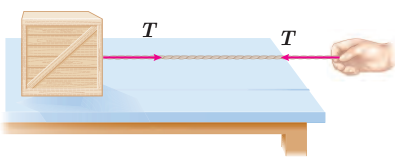
ب)

$$kx = mg \Rightarrow (۹۸\,N/m)x = (۳۰۰\times۱۰^{-۳}kg)(۹/۸\,N/kg) \Rightarrow$$

$$x = ۰/۰۳۰\,m = ۳/۰\,cm$$

$$x = L - L_\circ \Rightarrow ۳/۰\,cm = L - ۱۰/۰\,cm \Rightarrow L = ۱۳/۰\,cm$$

نیروی کشش طناب : وقتی طناب (کابل، ریسمان و...) متصل به جسمی را مانند شکل ۲ــ۱۷ می‌کشیم، طناب جسم را با نیرویی می‌کشد که جهت آن از جسم به سمت بیرون و در راستای طناب است. چون در این حالت طناب تحت کشش قرار دارد، به این نیرو، نیروی کشش طناب گفته می‌شود و آن را با $\vec{T}$ نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل می‌بینید طناب دست را نیز با نیروی T می‌کشد. بزرگی نیروی کشش طناب برابر با بزرگی نیروی $\vec{T}$ وارد بر جسم است. مثلاً اگر بزرگی نیروی وارد بر جسم از طرف طناب ۶۰N باشد، کشش طناب نیز ۶۰N است ($T=۶۰N$). در این کتاب از جرم طناب و همچنین از کش آمدن آن صرف نظر می‌شود. بنابراین طناب فقط به‌عنوان رابط بین دو جسم عمل می‌کند و هر دو جسم (دست و جعبه) را با بزرگی نیروی یکسان T می‌کشد، حتی اگر این دو جسم و طناب شتاب‌دار باشند.



شکل ۲ــ۱۷ طناب جسم را با نیروی کشش $\vec{T}$ می‌کشد.

توجه : در حل مسئله‌های دینامیک به کمک قانون‌های نیوتون، معمولاً گام‌های مشخصی طی می‌شود. این گام‌ها که در حل مسائل می‌توان استفاده کرد، عبارت‌اند از :

۱ــ با مشخص کردن جسم مورد نظر، شکل ساده‌ای از آن را رسم و دستگاه محورهای مختصات را مشخص می‌کنیم.

۲ــ نیروهای وارد بر جسم از طرف اجسام دیگر را مشخص و رسم می‌کنیم (در این کتاب، این نیروها فقط در راستاهای افقی و قائم هستند و در جایی نیاز به تجزیهٔ نیروها پیدا نمی‌کنیم).

۳ــ در صورت لزوم نیروهایی مانند وزن، اصطکاک، کشسانی فنر، کشش نخ و ... را محاسبه می‌کنیم.

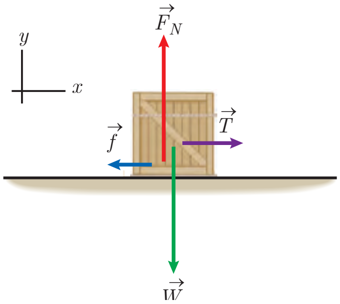
۴ــ قانون دوم نیوتون را بنا به نیاز در راستای قائم و افقی به‌کار می‌بریم. در این کتاب فقط به بررسی مسئله‌های تک‌جسمی می‌پردازیم.

مثال ۲ـ۹



در شکل روبه‌رو، کارگری جعبهٔ ساکنی را با طنابی افقی با نیروی ثابت افقی ۳۱۰N می‌کشد. اگر جرم جعبه ۱۰۰kg و ضریب اصطکاک ایستایی و جنبشی بین جعبه و سطح به‌ترتیب ۰/۳۰۰ و ۰/۲۵۰ باشد،

الف) آیا جعبه شروع به حرکت می‌کند؟



ب) اگر جعبه حرکت کند، شتاب حرکت آن را حساب کنید.

پ) سرعت جعبه را $۶/۰\,s$ پس از حرکت به‌دست آورید. $(g = ۹/۸۰\,m/s^۲)$

پاسخ : الف) شکل ساده‌ای از جسم مورد نظر (جعبه) رسم و نیروهای وارد بر آن را مشخص می‌کنیم. چون جعبه در راستای قائم حرکت ندارد، می‌توانیم بنویسیم :

$$F_N - W = ۰ \Rightarrow F_N = W \Rightarrow F_N = mg = (۱۰۰kg)(۹/۸۰N/kg) = ۹۸۰N$$

برای اینکه جسم شروع به حرکت کند، باید $T > f_{s,\max}$ باشد. پس ابتدا $f_{s,\max}$ را از معادلهٔ ۲ــ۴ به‌دست می‌آوریم :

$$f_{s,\max} = \mu_s F_N = (۰/۳۰۰)(۹۸۰N) = ۲۹۴N$$

با توجه به اینکه $T = ۳۱۰N > ۲۹۴N$ است، جعبه شروع به حرکت می‌کند.

ب) نیروی اصطکاک جنبشی در خلاف جهت حرکت بر جعبه اثر می‌کند و برابر است با :

$$f_k = \mu_k F_N = (۰/۲۵۰)(۹۸۰N) = ۲۴۵N$$

$$T - f_k = ma \Rightarrow ۳۱۰N - ۲۴۵N = (۱۰۰kg)a \Rightarrow a = ۰/۶۵\,m/s^۲$$

پ) چون شتاب جعبه ثابت است، از رابطهٔ سرعت ــ زمان در حرکت با شتاب ثابت روی مسیر مستقیم استفاده می‌کنیم :

$$v = at + v_۰ \Rightarrow v = (۰/۶۵m/s^۲)(۶/۰s) + (۰/۰m/s) \Rightarrow v = ۳/۹\,m/s$$

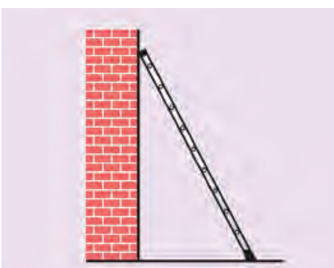
علامت مثبت نشان می‌دهد که سرعت نیز در جهت محور x است.

تمرین ۲ــ۶

کارگری یک سطل محتوی مصالح به جرم $۱۶/۰kg$ را با طناب سبکی به طرف بالا می‌کشد. اگر شتاب رو به بالای سطل $۱/۲۰\,m/s^۲$ باشد، نیروی کشش طناب چقدر است؟ $(g = ۹/۸۰\,m/s^۲)$



مثال ۲ــ۱۰



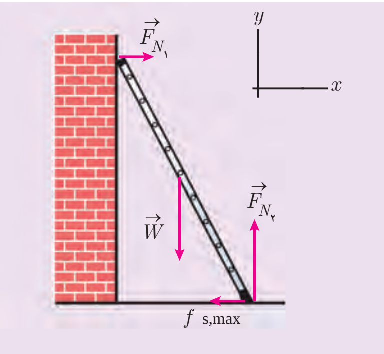
در شکل روبه‌رو نردبانی به جرم $۲۰/۰\,kg$ به دیوار قائم بدون اصطکاکی تکیه داده شده است. ضریب اصطکاک ایستایی بین زمین و پای نردبان $۰/۴۶۰$ است. در آستانهٔ سُرخوردن نردبان،

الف) سطح زمین به نردبان چه نیرویی وارد می‌کند؟

ب) چه نیرویی از دیوار به نردبان وارد می‌شود؟

پاسخ : الف) نخست نیروهای وارد بر نردبان را رسم می‌کنیم که عبارت‌اند از :

نیروی عمودی سطح دیوار $(\vec{F}_{N_۱})$، نیروی وزن $(\vec{W})$، نیروی عمودی سطح زمین $(\vec{F}_{N_۲})$ و نیروی اصطکاک ایستایی بین زمین و نردبان $(f_{s,\max})$.



یک دستگاه مختصات انتخاب می‌کنیم.

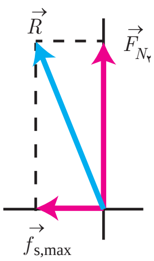
در آستانهٔ حرکت، نردبان همچنان در حال تعادل است. بنابراین نیروی خالص در راستای قائم و افقی صفر است.

$$F_{N_2} - W = ۰ \Rightarrow F_{N_2} = W = mg = (۲۰/۰\,\mathrm{kg})(۹/۸۰\,\mathrm{N/kg}) = ۱۹۶\mathrm{N}$$

$$f_{s,max} = \mu_s F_{N_2} = (۰/۴۶۰) \times (۱۹۶\mathrm{N}) = ۹۰/۲\mathrm{N}$$

از طرف سطح زمین بر نردبان دو نیروی عمودی F_{N_2} و افقی $f_{s,max}$ وارد می‌شود.

بنابراین برایند این دو نیرو که آن را با $\vec{R}$ نشان می‌دهیم، نیرویی است که سطح زمین بر نردبان وارد می‌کند :



$$\vec{R} = \vec{F}_{N_2} + \vec{f}_{s,max}$$

که بزرگی آن برابر است با

$$R = \sqrt{F_{N_2}^۲ + f_{s,max}^۲} = \sqrt{(۱۹۶\mathrm{N})^۲ + (۹۰/۲\mathrm{N})^۲} = ۲۱۶\mathrm{N}$$

ب) برایند نیروهای افقی وارد بر نردبان صفر است؛ پس :

$$F_{N_1} - f_{s,max} = ۰ \Rightarrow F_{N_1} = f_{s,max} = ۹۰/۲\mathrm{N}$$

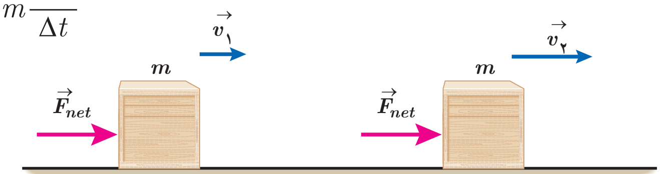
در نبود نیروی اصطکاک بین نردبان و دیوار، نیروی F_{N_1} همان نیروی وارد از دیوار به نردبان است.

۲ــ۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

قانون‌های نیوتون به ما امکان حل بسیاری از مسائل مکانیک را می‌دهند. قانون دوم نیوتون را می‌توان به‌صورت دیگری نیز نوشت که در بسیاری از موارد مناسب‌تر است و برخی از پدیده‌های فیزیکی را به کمک آن می‌توان ساده‌تر توجیه و بررسی کرد.

فرض کنید سرعت جسمی به جرم m تحت تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{net}$ در بازهٔ زمانی Δt از $\vec{v}_۱$ به $\vec{v}_۲$ برسد. در این صورت قانون دوم نیوتون به‌صورت زیر درمی‌آید :

$$\vec{F}_{net} = m\vec{a} = m\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$



شکل ۲ ــ ۱۸ سرعت جسم تحت‌تأثیر نیروی خالص ثابت $\vec{F}_{net}$ از $\vec{v}_۱$ به $\vec{v}_۲$ می‌رسد.

با فرض ثابت بودن جرم جسم (m) می‌توانیم جرم را در کنار سرعت $(\vec{v})$ قرار دهیم.

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

حاصل‌ضرب جرم جسم (m) در سرعت آن $(\vec{v})$، تکانهٔ جسم نامیده می‌شود و آن را با $\vec{p}$ نشان می‌دهیم.

$$\vec{p} = m\vec{v} \qquad \text{(تکانهٔ جسم)} \qquad (۲\text{ـ}۸)$$

تکانه کمیتی برداری است زیرا سرعت، یک کمیت برداری و جرم، یک کمیت نرده‌ای است. جهت تکانه همان جهت سرعت است. یکای SI تکانه kg.m/s است. با توجه به تعریف تکانه، قانون دوم نیوتون برای نیروی ثابت را می‌توان چنین نوشت:

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \qquad \text{(قانون دوم نیوتون برحسب تکانه برای نیروی ثابت)} \qquad (۲\text{ـ}۹)$$

یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانهٔ جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برابر با حاصل‌ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

$$\Delta \vec{p} = \vec{F}_{net}\,\Delta t \qquad (۲\text{ـ}۱۰)$$

تمرین ۲ــ۷

نشان دهید بین اندازهٔ تکانه (p) و انرژی جنبشی (K) جسمی به جرم m، رابطهٔ $K = \frac{p^۲}{۲m}$ برقرار است.

مثال ۲ــ۱۱

گلوله‌ای به جرم ۱۰/۰g با سرعت $\vec{v} = (۵/۰\,\text{m/s})\,\vec{i}$ در حال حرکت است. الف) تکانهٔ گلوله را تعیین کنید. ب) انرژی جنبشی گلوله را به‌دست آورید.

پاسخ: الف) با استفاده از معادلهٔ ۲ــ۸، تکانهٔ جسم را به‌دست می‌آوریم:

$$\vec{p} = m\vec{v} = (۱۰/۰ \times ۱۰^{-۳}\,\text{kg})(۵/۰\,\text{m/s})\,\vec{i}$$

$$= (۰/۰۵۰\,\text{kg.m/s})\,\vec{i} \Rightarrow p = ۰/۰۵۰\ \text{kg.m/s}$$

ب) برای به‌دست آوردن انرژی جنبشی می‌توانیم از رابطهٔ $K = \frac{p^۲}{۲m}$ یا $K = \frac{۱}{۲}mv^۲$ استفاده کنیم. در اینجا از رابطهٔ اول استفاده می‌کنیم:

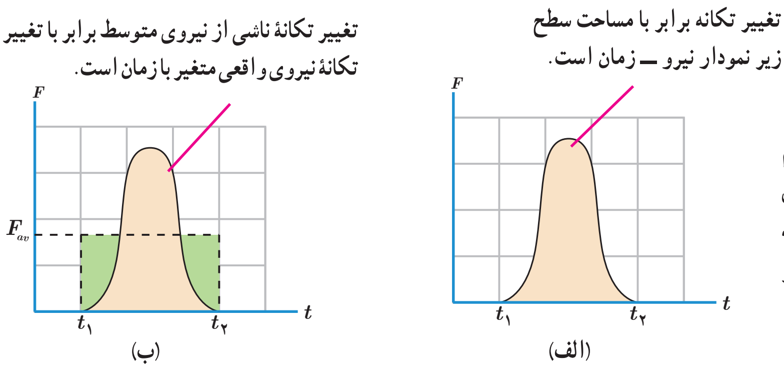
$$K = \frac{p^۲}{۲m} = \frac{(۰/۰۵۰\,\text{kg.m/s})^۲}{(۲ \times ۱۰/۰ \times ۱۰^{-۳}\,\text{kg})} = ۰/۱۲۵\text{J}$$

در شرایط واقعی نیروی وارد بر یک جسم به‌ندرت ثابت است. اگر نیرو ثابت نباشد، معادله‌های داده شده را فقط برای بازه‌های زمانی‌ای می‌توان به‌کار برد که بسیار کوچک باشد و بتوان نیرو را در این بازه‌ها تقریباً ثابت در نظر گرفت. برای بازهٔ زمانی بزرگ به‌جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصلهٔ زمانی مورد نظر را به‌کار برد و بنابراین رابطهٔ (۲ــ۹) چنین می‌شود:

$$\vec{F}_{av} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \qquad \text{(نیروی خالص متوسط برحسب تکانه)} \qquad (۲\text{ـ}۱۱)$$

این نتیجه به کاربردهای جالبی در توجیه و بررسی پدیده‌های فیزیکی می‌انجامد.

تغییر تکانهٔ یک جسم (یعنی $\Delta \vec{p} = \vec{F}_{av}\,\Delta t$) را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو ــ زمان نیز به دست آورد (شکل ۲ــ۱۹).



شکل ۲ـ۱۹ الف) نیروی خالص وارد بر یک جسم می‌تواند برحسب زمان تغییر کند. ب) مقدار نیروی متوسط (F_{av}) (خطچین افقی) به‌گونه‌ای است که مساحت مستطیل ($F_{av}\Delta t$) برابر با مساحت سطح زیر منحنی شکل الف باشد.

مثال ۲ــ۱۲



شکل روبه‌رو صحنه‌ای از یک آزمون تصادف را نشان می‌دهد که در آن خودرویی به جرم ۱۲۰۰kg به دیواری برخورد کرده و سپس برمی‌گردد. اگر تندی اولیه و نهایی خودرو به ترتیب ۵۴/۰ km/h و ۹/۰۰ km/h باشد و تصادف ۰/۱۵۰s طول بکشد،

الف) تغییر تکانهٔ خودرو را پیدا کنید.

ب) اندازه و جهت نیروی متوسط وارد بر خودرو را تعیین کنید.

پاسخ : الف) جهت محور x را به طرف راست انتخاب می‌کنیم و تکانه‌ها را با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۸ به‌دست می‌آوریم.

$$v_1 = +۵۴/۰\,\text{km/h} = +۱۵/۰\,\text{m/s} \quad و \quad v_2 = -۹/۰۰\,\text{km/h} = -۲/۵۰\,\text{m/s}$$

$$p_1 = mv_1 = (۱۲۰۰\,\text{kg})(+۱۵/۰\,\text{m/s}) = +۱/۸۰\times۱۰^{۴}\,\text{kg.m/s} = +۱۸/۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg.m/s}$$

$$p_2 = mv_2 = (۱۲۰۰\,\text{kg})(-۲/۵۰\,\text{m/s}) = -۳/۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg.m/s}$$

$$\Delta p = (-۳/۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg.m/s}) - (+۱۸/۰\times۱۰^{۳}\,\text{kg.m/s}) = -۲/۱۰\times۱۰^{۴}\,\text{kg.m/s}$$

ب) نیروی متوسط وارد بر اتومبیل با استفاده از رابطهٔ ۲ــ۱۱ برابر است با :

$$F_{av} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-۲/۱\times۱۰^{۴}\,\text{kg.m/s}}{۰/۱۵۰\,\text{s}} = -۱/۴\times۱۰^{۵}\,\text{N}$$

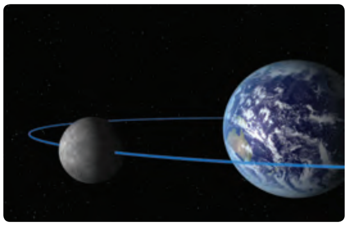
یعنی نیروی خالص متوسطی که از دیوار به خودرو وارد می‌شود در خلاف جهت محور x (یعنی به طرف چپ) است. توجه داریم اگر خودرو پس از برخورد، برنگردد نیروی متوسط وارد بر خودرو کوچک‌تر از مقداری است که اکنون به‌دست آوردیم.

۲ــ۴ نیروی گرانشی

وقتی سیبی از یک درخت جدا می‌شود، چه نیرویی سبب سقوط آن به طرف زمین می‌شود؟ وقتی شیر آب را باز می‌کنیم، چه نیرویی سبب می‌شود آب به طرف زمین شارش کند؟ چرا وقتی یک جسم را به بالا پرتاب می‌کنیم پس از مدتی به پایین می‌افتد؟ منشأ نیرویی که سبب چرخش ماه به‌دور زمین

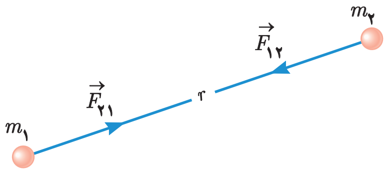
می‌شود چیست (شکل ۲ــ ۲۰)؟ زمین به همراه هفت سیارهٔ دیگر نیز به دور خورشید می‌چرخند؛ منشأ نیروی وارد بر زمین و سیارات دیگر چیست؟

تا سال ۱۶۸۷ داده‌های زیادی در مورد حرکت ماه و سیارات گردآوری شده بود، اما کسی شناخت روشنی از نیروهای مؤثر بر آنها نداشت. در آن سال ایزاک نیوتون، دانشمند انگلیسی، با انتشار کتاب اصول خود راز این معما را بیان کرد. از قانون‌های نیوتون می‌دانیم که باید نیروی خالصی بر ماه وارد شود. اگر چنین نبود، ماه به جای مدار تقریباً دایره‌ای به گرد زمین، باید روی خط راست حرکت می‌کرد. نیوتون استدلال کرد که این نیرو ناشی از نیروی جاذبهٔ بین ماه و زمین است و گفت این نیرو همان نیرویی است که اجسام نزدیک به سطح زمین ــ مانند سیب ــ را جذب می‌کند. نیوتون نشان داد هر جسمی در عالم، اجسام دیگر را به‌خود جذب می‌کند و این الهام‌بخش او برای قانون گرانش عمومی بوده است که بیان می‌دارد:



شکل ۲ــ ۲۰ اگر بر ماه نیرویی وارد نشود ماه باید به‌طور مستقیم حرکت کند نه به صورت دایره‌ای

نیروی گرانشی میان دو ذره[1] با حاصل‌ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصلهٔ آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.



شکل ۲ــ۲۱ نیروی گرانشی بین دو ذره جاذبه است و در امتداد خط واصل دو ذره وارد می‌شود. طبق قانون سوم نیوتون این دو یک جفت نیروی کنش ــ واکنش را تشکیل می‌دهند که:

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \Rightarrow F_{12} = F_{21} = F$$

اگر مطابق شکل ۲ــ۲۱، جرم دو ذره m_1 و m_2 و فاصلهٔ آنها از یکدیگر r باشد، اندازهٔ نیروی گرانشی میان دو ذره یعنی F از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad \text{(اندازهٔ نیروی گرانشی بین دو ذره)} \qquad (۲ــ۱۲)$$

در این رابطه، G ثابت گرانش عمومی نام دارد و برابر است با:

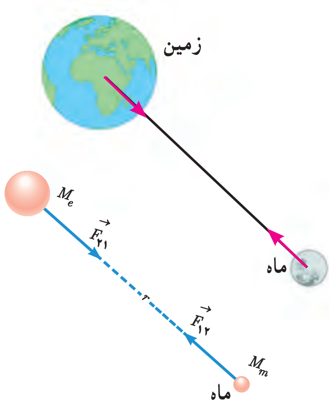
$$G = ۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\ \mathrm{N.m^2/kg^2}$$

فعالیت ۲ــ۵

ثابت گرانشی G را اولین بار هنری کاوندیش[2] در سال ۱۷۹۸ اندازه‌گیری کرد. در مورد روش اندازه‌گیری G توسط هنری کاوندیش تحقیق کنید و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

مثال ۲ــ۱۳

جرم زمین و ماه به‌ترتیب حدود $۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}$ kg و $۷/۳۶ \times ۱۰^{۲۲}$ kg و فاصلهٔ متوسط آنها از یکدیگر حدود $۳/۸۴ \times ۱۰^{۸}$ m است. نیروی گرانشی را که زمین و ماه به یکدیگر وارد می‌کنند پیدا کنید.



پاسخ: فاصلهٔ دو کره در این مثال خیلی بزرگ‌تر از قطر کره‌هاست. بنابراین می‌توان کره‌ها را ذره فرض کرد.

به کمک رابطهٔ ۲ــ ۱۲، نیروی گرانشی را که زمین و ماه بر هم وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم:

$$F_{12} = F_{21} = G\frac{M_e M_m}{r^2} = (۶/۶۷ \times ۱۰^{-۱۱}\mathrm{N.m^2/kg^2})\frac{(۵/۹۸ \times ۱۰^{۲۴}\mathrm{kg})(۷/۳۶ \times ۱۰^{۲۲}\mathrm{kg})}{(۳/۸۴ \times ۱۰^{۸}\mathrm{m})^2} = ۱/۹۹ \times ۱۰^{۲۰}\mathrm{N}$$

این نیرو سبب چرخش ماه به دور زمین می‌شود.

۱ــ اگر فاصلهٔ دو جسم از یکدیگر چنان زیاد باشد که بتوان از ابعاد هر یک از دو جسم در مقایسه با فاصلهٔ آنها چشم‌پوشی کرد، می‌توان دو جسم را به‌صورت ذره درنظر گرفت.

۲ــ Henry Cavendish

مثال ۲ــ۱۴

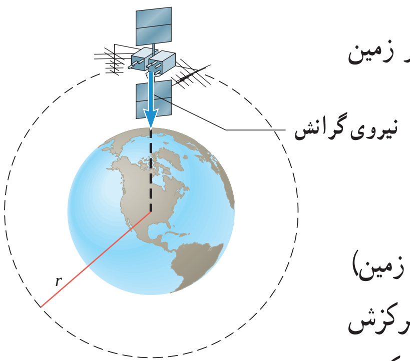
دو کرهٔ همگن به جرم‌های kg ۸۰/۰ و kg ۱۲۰/۰ را درنظر بگیرید که فاصلهٔ مرکز آنها از یکدیگر m ۱/۰۰ است. نیروی گرانشی را که این دو کره بر یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه کنید.

پاسخ : برای محاسبهٔ نیرویی که دو کرهٔ همگن به‌هم وارد می‌کنند می‌توانیم فرض کنیم همهٔ جرم‌های دو کره در مرکز آنها قرار دارد، بنابراین کره‌ها را به‌صورت ذراتی در نظر می‌گیریم که همان جرم کره‌ها را داشته باشند. به کمک رابطهٔ ۲ــ۱۲، نیروی گرانشی را که دو کره به یکدیگر وارد می‌کنند محاسبه می‌کنیم :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} = (6/67\times10^{-11}N.m^2/kg^2)\frac{(80/0kg)(120/0kg)}{(1/00m)^2} = 6/40\times10^{-7}N$$

همان‌طور که محاسبهٔ این مثال نشان می‌دهد، نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم کوچک قابل ملاحظه نیست.

مثال ۲ــ۱۵



ماهواره‌ها در اثر نیروی گرانشی بین زمین و ماهواره، روی مدار تقریباً دایره‌ای به دور زمین می‌چرخند. اگر جرم ماهواره kg ۲۰۰/۰ و فاصلهٔ آن از سطح زمین km ۲۶۰۰ باشد :

الف) نیروی گرانشی بین ماهواره و زمین چقدر است؟

ب) نمودار نیروی گرانشی وارد بر ماهواره را بر حسب فاصلهٔ آن از مرکز زمین رسم کنید.

$(R_e = 6400km$ = شعاع زمین $, M_e = 5/98\times10^{24}kg , G = 6/67\times10^{-11}N.m^2/kg^2)$

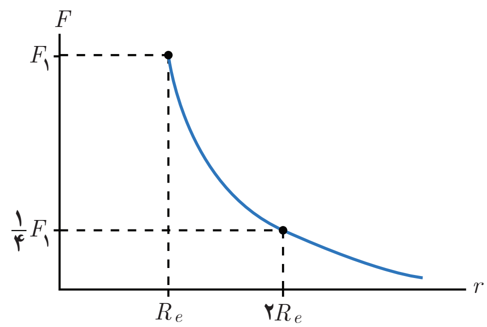
پاسخ : ماهواره را به‌صورت ذره و زمین را به‌صورت کره‌ای همگن که جرم آن در مرکزش قرار دارد در نظر می‌گیریم و به کمک رابطه ۲ــ۱۲، نیروی گرانشی بین آنها را محاسبه می‌کنیم.

الف)

$$r = R_e + h = 6400km + 2600km = 9000 km = 9/000\times10^6m$$

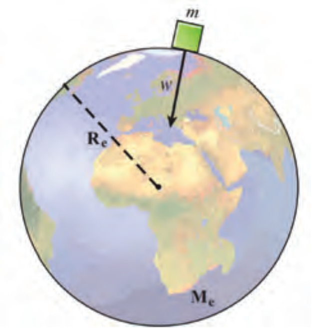
$$F = G\frac{M_e m}{r^2} = (6/67\times10^{-11}N.m^2/kg^2)\frac{(5/98\times10^{24}kg)(200/0kg)}{(9/000\times10^6m)^2} = 985N$$

ب) بیشترین نیروی گرانشی بر ماهواره در سطح زمین به آن وارد می‌شود. هر چه فاصلهٔ ماهواره بیشتر شود، نیروی گرانشی با وارون مربع فاصله کاهش می‌یابد. بنابراین نمودار آن به‌شکل زیر خواهد بود.



وزن و نیروی گرانشی : در بخش ۲ــ۲، در مورد وزن یک جسم مطالبی را آموختیم. در آنجا گفتیم وزن یک جسم روی زمین برابر با نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند (شکل ۲ــ۲۲). اگر جرم جسم را با m، جرم زمین را با M_e و شعاع زمین را با R_e نمایش دهیم، وزن جسم در سطح زمین از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$W = G\frac{M_e m}{R_e^۲} \qquad \text{(وزن جسم در سطح زمین)} \qquad (۲ــ۱۳)$$



شکل ۲ــ۲۲ وزن نیروی گرانشی است که زمین بر جسم وارد می‌کند.

تمرین ۲ــ۸

نشان دهید که شتاب گرانشی در سطح زمین از رابطهٔ $g = G\frac{M_e}{R_e^۲}$ به‌دست می‌آید.

مثال ۲ــ۱۶

ماهواره‌ای مخابراتی در ارتفاع ۳۵۶۰۰ کیلومتری سطح زمین به دور زمین می‌چرخد. شتاب گرانشی در این ارتفاع چقدر است؟ (M_e=۵/۹۸×۱۰^۲۴kg و R_e=۶۴۰۰km)

پاسخ : شتاب گرانشی در فاصلهٔ r از مرکز زمین از رابطهٔ $g = G\frac{M_e}{r^۲}$ محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن $r = R_e + h$ می‌توانیم بنویسیم :

$$g = (۶/۶۷\times ۱۰^{-۱۱}\text{N.m}^۲/\text{kg}^۲)\frac{۵/۹۸\times ۱۰^{۲۴}\text{kg}}{(۶۴۰۰\times ۱۰^۳\text{m} + ۳۵۶۰۰\times ۱۰^۳\text{m})^۲} = ۰/۲۲۶\text{m/s}^۲$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار g در این فاصله بسیار ناچیز است.

تمرین ۲ــ۹

تلسکوپ فضایی هابل در ارتفاع تقریبی ۶۰۰ کیلومتری از سطح زمین به دور زمین می‌چرخد.

الف) شتاب گرانشی در این فاصله چقدر است؟

ب) وزن این تلسکوپ در این ارتفاع چند برابر وزن آن روی زمین است؟

۲ـ۱ و ۲ـ۲ قوانین حرکت نیوتون و معرفی برخی از نیروهای خاص

۱. سیبی را در نظر بگیرید که به شاخهٔ درختی آویزان است و سپس از درخت جدا می‌شود.

الف) با رسم شکل نیروهای وارد بر سیب را قبل و بعد از جداشدن از درخت نشان دهید. ب) در هر حالت واکنش این نیروها بر چه اجسامی وارد می‌شود؟

۲. دانش‌آموزی به جرم $50/0\ kg$ روی یک ترازوی فنری در آسانسور ایستاده است. در هر یک از حالت‌های زیر این ترازو چند نیوتون را نشان می‌دهد؟ $(g=9/80 N/kg)$

الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت حرکت می‌کند.

پ) آسانسور با شتاب $1/2 m/s^2$ به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند.

ت) آسانسور با شتاب $1/2 m/s^2$ به طرف پایین شروع به حرکت می‌کند.

۳. در شکل نشان داده شده، شخص با نیروی $200 N$ جسم $90/0$ کیلوگرمی را هُل می‌دهد، اما جسم ساکن می‌ماند. ولی وقتی با نیروی $300 N$ جسم را هُل می‌دهد، جسم در آستانهٔ حرکت قرار می‌گیرد.

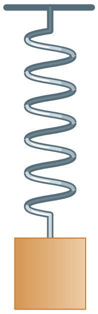


الف) نیروی اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح در هر حالت چقدر است؟

ب) ضریب اصطکاک ایستایی بین جسم و سطح چقدر است؟

پ) اگر پس از حرکت، شخص با نیروی $200 N$ جسم را هُل دهد و ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح و جسم $0/20$ باشد، شتاب حرکت جسم چقدر خواهد شد؟

۴. در شکل روبه‌رو وقتی وزنهٔ $4/0\ kg$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر $14/0 cm$ می‌شود، و وقتی وزنهٔ $5/0\ kg$ را به فنر آویزان می‌کنیم، طول فنر $15/0 cm$ می‌شود.



الف) ثابت فنر چقدر است؟ ب) طول عادی فنر (بدون وزنه) چند سانتی‌متر است؟

۵. در هر یک از موارد زیر، نیروهای وارد بر جسم را مشخص کنید. واکنش هر یک از این نیروها به چه جسمی وارد می‌شود؟

الف) خودرویی با سرعت ثابت در یک مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است.

ب) کشتی‌ای با سرعت ثابت در حال حرکت است.

پ) قایقرانی در حال پارو زدن است.

ت) چتربازی در هوای آرام و در امتداد قائم در حال سقوط است.

ث) هواپیمایی در یک سطح پروازی افقی با سرعت ثابت در حال حرکت است.

ج) توپی در راستای قائم به زمین برخورد می‌کند و برمی‌گردد.

۶. رانندهٔ خودرویی که با سرعت $72/0 km/h$ در یک مسیر مستقیم در حال حرکت است، با دیدن مانعی اقدام به ترمز می‌کند و خودرو پس از طی مسافت $20/0\ m$ متوقف می‌شود.

الف) شتاب خودرو در مدت ترمز چقدر است؟

ب) از لحظهٔ ترمز تا توقف کامل خودرو، چقدر طول می‌کشد؟

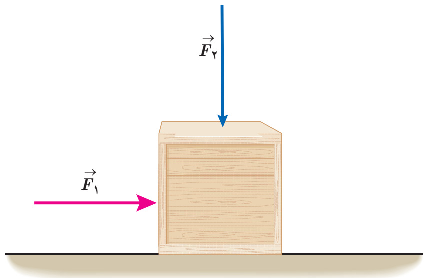
پ) نیروی اصطکاک بین لاستیک‌ها و سطح چقدر است؟

جرم خودرو را $1200 kg$ درنظر بگیرید.

۷. چتربازی از یک بالگرد تقریباً ساکن که در ارتفاع نسبتاً زیادی قرار دارد، به بیرون می‌پرد و پس از مدتی چتر خود را باز می‌کند و در امتداد قائم سقوط می‌کند. حرکت چترباز را از لحظهٔ پرش تا رسیدن به زمین تحلیل کنید و نموداری تقریبی از تندی آن بر حسب زمان رسم کنید.

۸. در شکل صفحه بعد، نیروی F_1 به بزرگی $20/0 N$ بر جعبه وارد شده است، اما جعبه همچنان ساکن است. اگر در همین حالت بزرگی نیروی قائم $\vec{F}_2$ که جعبه را به زمین می‌فشارد از صفر

شروع به افزایش کند، کمیت‌های زیر چگونه تغییر می‌کنند؟



الف) اندازهٔ نیروی عمودی سطح وارد بر جعبه

ب) اندازهٔ نیروی اصطکاک ایستایی وارد بر جعبه

پ) اندازهٔ بیشینهٔ نیروی اصطکاک ایستایی

ت) نیروی خالص وارد بر جسم

۹. می‌خواهیم به جسمی که جرم آن ۵/۰ kg است، شتاب ۲/۰ m/s^2 بدهیم. در هر یک از حالت‌های زیر، نیرویی را که باید به جسم وارد کنیم محاسبه کنید. از مقاومت هوا صرف‌نظر می‌شود.

الف) جسم روی سطح افقی بدون اصطکاک حرکت کند.

ب) جسم روی سطح افقی با ضریب اصطکاک ۰/۲۰ به طرف راست حرکت کند، و شتابش نیز به طرف راست باشد.

پ) جسم در راستای قائم با شتاب رو به بالا شروع به حرکت کند.

ت) جسم در راستای قائم با شتاب رو به پایین شروع به حرکت کند.

۱۰. قطعه‌چوبی را با سرعت افقی ۱۰/۰m/s روی سطحی افقی پرتاب می‌کنیم. ضریب اصطکاک جنبشی بین چوب و سطح ۰/۲۰ است.

الف) چوب پس از پیمودن چه مسافتی می‌ایستد؟

ب) اگر از یک قطعه‌چوب دیگر استفاده کنیم که جرم آن دو برابر جرم قطعه‌چوب اول و ضریب اصطکاک جنبشی آن با سطح افقی با اولی یکسان باشد و با همان سرعت پرتاب شود، مسافت پیموده شدهٔ آن چند برابر می‌شود؟

۱۱. وزنه‌ای به جرم ۲/۰ kg را به انتهای فنری به طول ۱۲cm که ثابت آن ۲۰N/cm است می‌بندیم و فنر را از سقف یک آسانسور آویزان می‌کنیم. طول فنر را در حالت‌های الف تا ت محاسبه کنید.

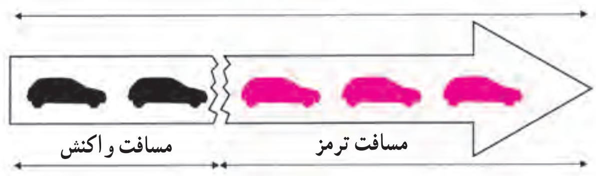
الف) آسانسور ساکن است.

ب) آسانسور با سرعت ثابت ۲/۰m/s رو به پایین در حرکت است.

پ) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰ m/s^2 از حال سکون رو به پایین شروع به حرکت کند.

ت) آسانسور با شتاب ثابت ۲/۰ m/s^2 از حال سکون رو به بالا شروع به حرکت کند.

۱۲. برای یک راننده دانستن کل مسافت توقف خودرو اهمیت دارد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد کل مسافت توقف، دو قسمت دارد؛ مسافت واکنش (مسافتی که خودرو از لحظهٔ دیدن مانع تا ترمزگرفتن طی می‌کند) و مسافت ترمز (مسافتی که خودرو از لحظه ترمزگرفتن تا توقف کامل طی می‌کند).



کل مسافت توقف = مسافت ترمز + مسافت واکنش

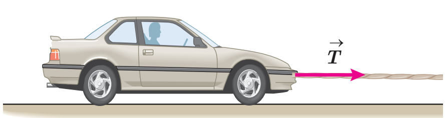
الف) دو عامل مؤثر در مسافت واکنش را بنویسید.

ب) زمان واکنش راننده‌ای ۰/۶۰s است. در طی این زمان، خودرو مسافت ۱۸m را طی می‌کند. با فرض ثابت بودن سرعت در این مدت، اندازهٔ آن را حساب کنید.

پ) اگر در این سرعت راننده ترمز کند و خودرو پس از ۵/۰s متوقف شود، مسافت ترمز و شتاب خودرو را حساب کنید.

ت) وقتی خودرو ترمز می‌کند، نیروی خالص وارد بر آن چقدر است؟ جرم خودرو را ۱۵۰۰kg فرض کنید.

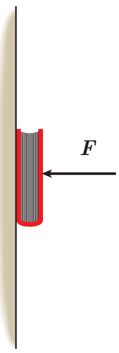
۱۳. یک خودروی باری با طناب افقی محکمی، یک خودروی سواری به جرم ۱۵۰۰kg را می‌کشد. نیروی اصطکاک و مقاومت هوا در مقابل حرکت خودروی سواری ۲۲۰N و ۳۸۰N است.



الف) اگر سرعت خودرو ثابت باشد نیروی کشش طناب T چقدر است؟

ب) اگر خودرو با شتاب ثابت ۲/۰m/s² به طرف راست کشیده شود، نیروی کشش طناب چقدر است؟

۱۴. کتابی را مانند شکل با نیروی عمودی F به دیوار قائمی فشرده و ثابت نگه داشته‌ایم.



الف) نیروهای وارد بر کتاب را رسم کنید.

ب) اگر جرم کتاب ۲/۵kg باشد، اندازهٔ نیروی اصطکاک را به دست آورید.

پ) اگر کتاب را بیشتر به دیوار بفشاریم، آیا نیروی اصطکاک تغییر می‌کند؟ با این کار چه نیروهایی افزایش می‌یابد؟

۲ـ۳ تکانه و قانون دوم نیوتون

۱۵. وقتی در خودروی ساکنی نشسته‌اید و خودرو ناگهان شروع به حرکت می‌کند، به صندلی فشرده می‌شوید. همچنین اگر در خودروی در حال حرکتی نشسته باشید، در توقف ناگهانی به جلو پرتاب می‌شوید.



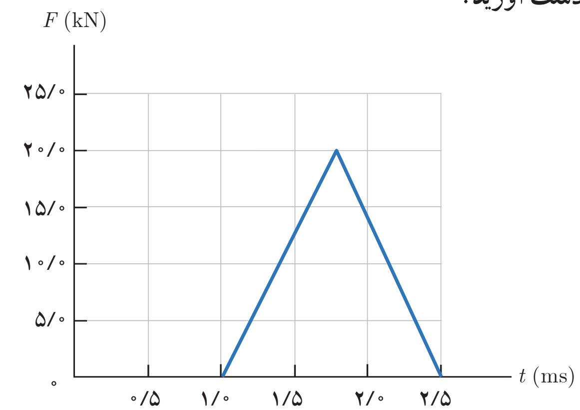
الف) علت این پدیده‌ها را توضیح دهید. ب) نقش کمربند ایمنی و کیسهٔ هوا در کم‌شدن آسیب‌ها در تصادف‌ها را بیان کنید.

۱۶. توپی به جرم ۲۸۰g با تندی ۱۵/۰m/s به‌طور افقی به بازیکنی نزدیک می‌شود. بازیکن با مشت به توپ ضربه می‌زند و باعث می‌شود توپ با تندی ۲۲/۰m/s در جهت مخالف برگردد.

الف) اندازهٔ تغییر تکانهٔ توپ را محاسبه کنید.

ب) اگر مشت بازیکن ۰/۰۶۰۰s با توپ در تماس باشد، اندازهٔ نیروی متوسط وارد بر مشت بازیکن از طرف توپ را به دست آورید.

۱۷. شکل زیر، منحنی نیروی خالص برحسب زمان را برای توپ بیسبالی که با چوب بیسبال به آن ضربه زده شده است، نشان می‌دهد. تغییر تکانهٔ توپ و نیروی خالص متوسط وارد بر آن را به دست آورید.



۲ـ۴ نیروی گرانشی

۱۸. دو جسم در فاصلهٔ ۲۰/۰m از هم، یکدیگر را با نیروی گرانشی کوچک $۱/۰۰\times۱۰^{-۸}$N، جذب می‌کنند. اگر جرم یکی از اجسام ۵۰/۰kg باشد، جرم جسم دیگر چقدر است؟

۱۹. الف) در چه ارتفاعی از سطح زمین، وزن یک شخص به نصف مقدار خود در سطح زمین می‌رسد؟

ب) اگر جرم ماهواره‌ای ۲۵۰kg باشد، وزن آن در ارتفاع ۳۶۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین چقدر خواهد شد؟

$(M_e=۵/۹۸\times۱۰^{۲۴}\text{kg}$ و $R_e=۶۴۰۰\text{km})$

۲۰. الف) شتاب گرانشی ناشی از خورشید در سطح زمین چقدر است؟

ب) شتاب گرانشی ناشی از ماه در سطح زمین چقدر است؟

$M_{\text{خورشید}}=۱/۹۹\times۱۰^{۳۰}\text{kg}$ و $M_{\text{ماه}}=۷/۳۶\times۱۰^{۲۲}\text{kg}$

فاصلهٔ زمین تا خورشید = $۱۴۹/۶\times۱۰^{۶}$km

فاصلهٔ زمین تا ماه= $۳/۸۴\times۱۰^{۵}$km

۲۱. الف) سفینه‌ای به جرم $۳/۰۰\times۱۰^{۴}$kg در وسط فاصلهٔ بین زمین و ماه قرار دارد. نیروی گرانشی خالصی را که از طرف زمین و ماه به این سفینه در این مکان وارد می‌شود به‌دست آورید (از داده‌های مسئله‌های قبل استفاده کنید).

ب) در چه فاصله‌ای از زمین، نیروی گرانشی ماه و زمین بر سفینه، یکدیگر را خنثی می‌کنند؟

۳

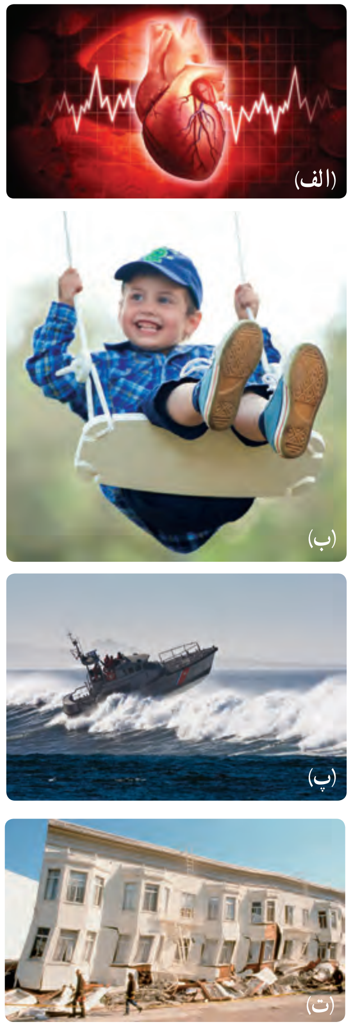
فصل

نوسان و امواج



عمل لیتوتریپسی (Lithotripsy)، روشی غیرتهاجمی برای شکستن سنگ‌های کلیه است. در این عمل، امواج فراصوتی روی سنگ‌های کلیه متمرکز می‌شوند، به‌طوری که با خرد شدن سنگ‌ها، آنها بتوانند از طریق مجاری ادراری خارج شوند. چگونه یک دستگاه عمل لیتوتریپسی می‌تواند امواج فراصوتی را بر یک سنگ کلیه چنان متمرکز کند که موجب شکستن آن شود؟

بخش‌ها

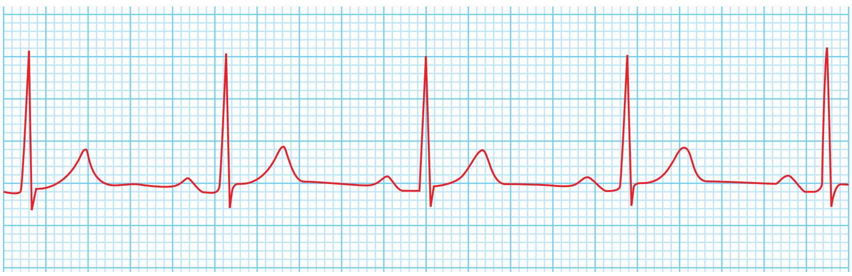


شکل ۳ــ۱ الف) ضربان قلب انسان، ب) تاب خوردن، پ) بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی، ت) زمین‌لرزه، نمونه‌هایی از نوسان هستند.

دنیای ما پر از نوسان است. ضربان قلب انسان، تاب خوردن، بالا و پایین رفتن سرنشینان کشتی روی امواج خروشان دریا و زمین‌لرزه نمونه‌هایی از این دست هستند (شکل ۳ــ۱). مطالعه و کنترل نوسان‌ها در سامانه‌های مختلف دو هدف اصلی فیزیک‌دان‌ها و مهندسان است. در این فصل نوعی از نوسان موسوم به نوسان دوره‌ای و نمونه‌ای مشهور از این نوع نوسان‌ها به نام حرکت هماهنگ ساده را بررسی می‌کنیم. در ادامه با پدیدهٔ تشدید و سپس با موج و انواع آن آشنا می‌شویم و آنگاه به موج‌های عرضی و طولی می‌پردازیم. نمونه‌ای از موج‌های عرضی که در این فصل بررسی می‌شود امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) و نمونه‌ای از موج‌های طولی که مورد بررسی قرار می‌گیرند، امواج صوتی هستند. همچنین امواج با محیطی که در آن منتشر می‌شوند برهم‌کنش نیز می‌کنند. بازتاب و شکست امواج نمونه‌هایی از این برهم‌کنش هستند که به‌خصوص کاربردهایی فراوان در علوم‌طبیعی دارند.

۳ــ۱ نوسان دوره‌ای

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیردوره‌ای باشند؛ مثلاً شکل ۳ــ۲ تصویری از ضرباهنگِ (ریتمِ) قلب یک شخص را نشان می‌دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به‌طور منظم دقیقاً تکرار می‌شوند، که به آن چرخهٔ (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر چرخهٔ آن در دوره‌ای دیگر تکرار شود نوسان‌های دوره‌ای می‌نامند. مدت زمان یک چرخه، دورهٔ تناوب حرکت نامیده می‌شود و آن را با T نشان می‌دهند. بنابه این تعریف، دورهٔ تناوب ضربان قلب این شخص $\frac{۱}{۶۵}$ دقیقه، یا ۰/۹۲ ثانیه است.



شکل ۳ــ۲ نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگارهٔ[۱] (نوار قلب) یک شخص[۲]

تعداد نوسان‌های انجام شده (تعداد چرخه) در هر ثانیه بسامد (فرکانس) نامیده می‌شود و آن را با f نشان می‌دهند. بنابراین:

$$f = \frac{1}{T} \qquad \text{(بسامد)} \qquad (۳\text{ــ}۱)$$

یکای بسامد در SI، هرتز (Hz) است که به افتخار فیزیک‌دان آلمانی، هاینریش هرتز، نام‌گذاری شده است. طبق تعریف:

$$۱\ \text{Hz} = ۱\ \text{چرخه بر ثانیه} = ۱\ \text{s}^{-1}$$

پرسش ۳ــ۱

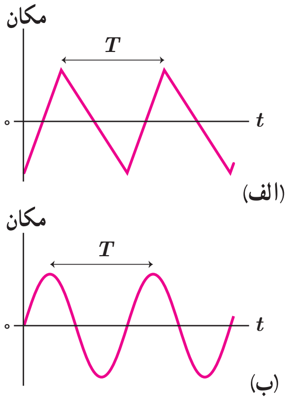
بسامد ضربان قلب مربوط به نمودار شکل ۳ــ۲ چقدر است؟

۱ــ Electro Cardio Gram (ECG)

۲ــ در این نمودار محور عمودی، ولتاژ و محور افقی، زمان است.

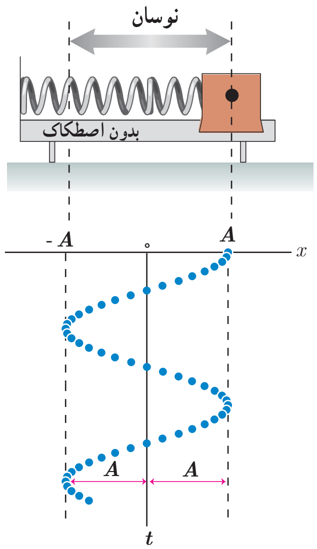
۳ــ۲ حرکت هماهنگ ساده

در بخش پیش با نمونه‌ای از یک نوسان دوره‌ای آشنا شدیم. شکل ۳ــ۳، دو نمونهٔ دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان ــ زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل ۳ــ۳ ب، به‌طور سینوسی[1] رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM)[2] گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنایی برای درک هر نوع نوسان دوره‌ای دیگر است زیرا در سطوح بالاتر نشان داده می‌شود که هر نوسان دوره‌ای را می‌توان مجموعی از نوسان‌های سینوسی در نظر گرفت.



شکل ۳ــ۳ نمودار مکان ــ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

یک نمونهٔ معروف از حرکت هماهنگ ساده، جرمی است که با یک فنر نوسان می‌کند. شکل ۳ــ۴ جسم متصل به فنری را نشان می‌دهد که روی سطح افقی بدون اصطکاکی قرار گرفته است. اگر جسم به اندازهٔ چند سانتی‌متر کشیده و سپس رها شود، به جلو و عقب نوسان خواهد کرد. اگر مکان جسم را در بازه‌های زمانی متوالی و یکسان ثبت کنیم به نموداری سینوسی می‌رسیم که در این شکل نشان داده شده است. در این شکل جسم بین $x=-A$ و $x=+A$ به جلو و عقب می‌رود که در آن A *دامنهٔ* حرکت است. به عبارتی دامنهٔ حرکت، بیشینهٔ فاصلهٔ جسم از *نقطهٔ تعادل* است. توجه کنید که دامنه، فاصلهٔ بین دو انتهای مسیر *نیست*.



شکل ۳ــ۴ سامانهٔ جسم و فنر، نمونهٔ مشهوری از یک حرکت هماهنگ ساده است.

همان‌طور که دیدیم، در حرکت هماهنگ ساده نمودار مکان ــ زمان، نموداری سینوسی است. یعنی مکان (یا جابه‌جایی نسبت به نقطهٔ تعادل) را می‌توان به‌صورت تابعی سینوسی یا کسینوسی از زمانِ t نوشت. در این کتاب برای سادگی تابع کسینوس را برمی‌گزینیم، یعنی فرض می‌کنیم در لحظهٔ $t=۰\,s$ نوسانگر در مکان بیشینهٔ خود، یعنی $x=+A$، باشد. بنابراین مکانِ $x(t)$ نوسانگر را می‌توان چنین نوشت:

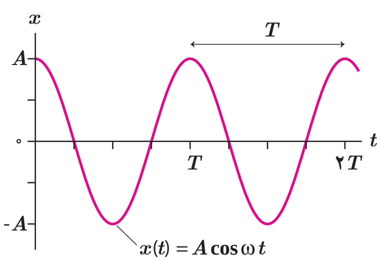
$$x(t) = A\cos\omega t \qquad \text{(معادلهٔ مکان ــ زمان در حرکت هماهنگ ساده)} \qquad (۳ــ۲)$$

در این رابطه ω بسامد زاویه‌ای نوسانگر نامیده می‌شود و برابر است با:

$$\omega = \frac{۲\pi}{T} = ۲\pi f \qquad \text{(بسامد زاویه‌ای)} \qquad (۳ــ۳)$$

یکای بسامد زاویه‌ای در SI برابر rad/s است.

توجه کنید که در رابطهٔ ۳ــ۲، شناسهٔ تابع کسینوس (یعنی ωt) برحسب رادیان است. شکل ۳ــ۵ نموداری از این تابع را نشان می‌دهد. اگر به حرکت سامانهٔ جرم ــ فنر شکل ۳ــ۴ توجه کنید درمی‌یابید که وقتی نوسانگر در $x=\pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است. به این نقطه‌ها اصطلاحاً *نقطه‌های بازگشتِ*[3] حرکت می‌گویند. همچنین وقتی $x=۰$ است (یعنی نوسانگر از نقطهٔ تعادل می‌گذرد) اندازهٔ سرعت بیشینه است، یعنی بسته به اینکه جسم در جهت $+x$ یا $-x$ از نقطهٔ تعادل بگذرد، $v=+v_{max}$ یا $v=-v_{max}$ خواهد بود[4]. اگرچه روابط ۳ــ۲ و ۳ــ۳ و بحث کوتاهی که دربارهٔ سرعت نوسانگر انجام دادیم برای سامانهٔ جرم ــ فنر بود، ولی برای هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای (از جمله آونگ ساده) برقرار است.



شکل ۳ــ۵ نمودار مکان ــ زمان برای حرکت هماهنگ ساده

۱ــ Sinusoidal. به‌طور عمومی به همهٔ تابع‌های سینوسی و کسینوسی، تابع سینوسی می‌گویند.

۲ــ Simple Harmonic Motion

۳ــ Turning Points

۴ــ بررسی روابط سرعت ــ زمان و سرعت ــ مکان در حرکت هماهنگ ساده خارج از اهداف آموزشی این کتاب است و نباید در ارزشیابی این درس مورد پرسش قرار گیرد.

فعالیت ۳ـ۱

نوسان‌نگار : نوسان‌نگار وسیله‌ای برای ثبت نوسان‌ها است. می‌خواهیم یک نوسان‌نگار ساده درست کنیم. به این منظور، یک وجه قطعه شیشه‌ای با طول و عرض تقریبی ۲۰cm و ۱۰cm را روی شعلهٔ شمعی بگیرید تا به خوبی دوداندود شود. سپس تیغهٔ نوک‌تیزی را به نوک یکی از شاخه‌های دیاپازون[۱] کم‌بسامدی (در حدود ۱۰۰Hz) محکم بچسبانید. دیاپازون را به نوسان وادارید و آن را به‌سرعت روی شیشهٔ دوداندود به حرکت درآورید، طوری‌که اثر نوک تیز تیغه روی سطح دوداندود بیفتد. روی شیشه، خط موج‌داری رسم می‌شود که به آن *نوسان‌نگاشت*[۲] گفته می‌شود.



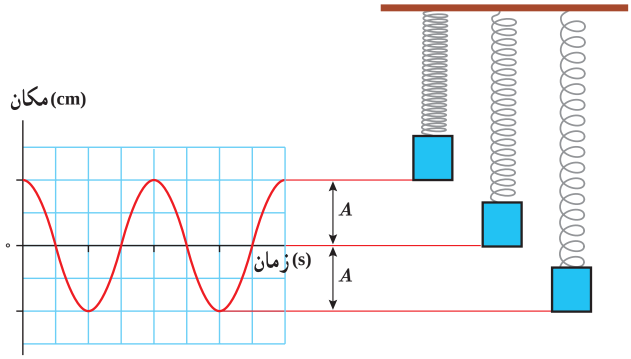
دیاپازون با تیغه‌ای نوک‌تیز



اثر ارتعاش‌های دیاپازون روی شیشهٔ دوداندود

مثال ۳ـ۱

جرمی متصل به یک فنر با بسامد ۰/۲۰ Hz و دامنهٔ ۳/۰ cm به‌طور هماهنگ ساده در امتداد قائم نوسان می‌کند. پس از گذشت ۱۰/۶۶s از رها شدن جرم از بالای نقطهٔ تعادل، جابه‌جایی این جرم نسبت به نقطهٔ تعادل چقدر است؟



پاسخ : با استفاده از رابطهٔ $x = A\cos\omega t$ جابه‌جایی نسبت به نقطهٔ تعادلِ جرم ــ فنر را محاسبه می‌کنیم :

که در آن :

$$A = ۰/۰۳۰\text{m}\ ,\ \omega = ۲\pi f = ۲\pi\,(۰/۲۰\text{s}^{-1}) = ۰/۴۰\pi\ \text{rad/s}\ ,\ t = ۱۰/۶۶\text{s}$$

در نتیجه، در یکای SI داریم[۳] :

$$x = (۰/۰۳۰\text{m})\cos(۰/۴۰\pi\ \text{rad/s} \times ۱۰/۶۶\text{s}) = ۰/۰۲۰\text{m}$$

تمرین ۳ـ۱

ذره‌ای در حال نوسان هماهنگ ساده با دورهٔ تناوب T است. با فرض اینکه در $t=۰\text{s}$ ذره در $x=+A$ باشد، تعیین کنید در هر یک از لحظات زیر، آیا ذره در $x=-A$، در $x=+A$، یا در $x=۰$ خواهد بود؟ الف) $t=۲/۰۰\,T$، ب) $t=۳/۵۰\,T$، پ) $t=۵/۲۵\,T$

(*راهنمایی :* برای پاسخ به این تمرین، ساده‌تر آن است که چند دوره از یک نمودار کسینوسی را رسم کنید.)

تمرین ۳ـ۲

در حرکت هماهنگ ساده، مکان $x(t)$ باید پس از گذشت یک دورهٔ تناوب برابر مقدار اولیه‌اش شود. یعنی اگر $x(t)$ مکان در زمان دلخواه t باشد، آن‌گاه نوسانگر باید در زمان $t+T$ دوباره به همان مکان بازگردد و بنابراین $A\cos\omega t = A\cos\omega(t+T)$. براین اساس نشان دهید $\omega=۲\pi/T$.

۱ــ Tuning Fork

۲ــ Oscillogram

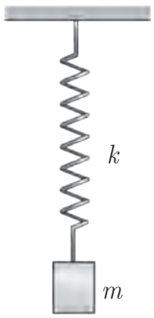
۳ــ اگر از ماشین حساب برای محاسبهٔ چنین روابطی استفاده می‌کنید، دقت کنید که مُدِ ماشین‌حساب روی رادیان (RAD) باشد.

آزمایش‌های متعدد با جرم و فنر نشان می‌دهد که افزایش جرم m در سامانهٔ جرم ــ فنر (با فنر یکسان) به کُند شدن نوسان‌ها، یعنی افزایش دورهٔ تناوب T می‌انجامد. همچنین اگر این آزمایش‌ها را با وزنه‌ای به جرم ثابت ولی فنرهایی با سختی متفاوت (k یِ متفاوت) انجام دهیم، درمی‌یابیم که با افزایش ثابت فنر k دورهٔ تناوب T یِ نوسان‌ها کوتاه‌تر می‌شود.



هاینریش هرتز (۱۸۹۴ــ۱۸۵۷ م.) در آلمان به دنیا آمد. او در ابتدا به رشته‌های معماری و مهندسی علاقه‌مند بود، اما خیلی زود از این علاقه دست کشید و به علوم پایه دل بست. او در دانشگاه برلین تحصیل کرد و از شاگردان *هرمن فون هلمهولتز* بود. هرتز پس از فارغ‌التحصیلی به تحقیق دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول پرداخت. او به خاطر آزمایش‌هایی که در این زمینه انجام داد به سمت استادی فیزیک دانشگاه پلی‌تکنیک کالسروهه منصوب شد. در آنجا یک فرستنده و یک گیرندهٔ رادیویی ساخت که مورد توجه قرار گرفت و به کمک آن توانست تندی امواج رادیویی را به‌دست آورد. آزمایش‌های متعدد هرتز، به قول خود او، همگی نشانه‌ای از پیروزی درخشان نظریهٔ ماکسول بود.

فعالیت ۳ــ۲



با انتخاب وزنه‌ها و فنرهای مختلف در آرایشی مطابق شکل، و با اندازه‌گیری زمان تعداد مشخصی نوسان کامل، و سپس محاسبهٔ دورهٔ تناوب T برای هر سامانهٔ جرم ــ فنر، به‌طور تجربی نشان دهید که :

الف) دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر با یک فنر معیّن ولی وزنه‌های متفاوت، با جذر جرم وزنه به‌طور مستقیم متناسب است ($T \propto \sqrt{m}$).

ب) دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر با یک وزنهٔ معیّن ولی فنرهای متفاوت، با جذر ثابت فنر به‌طور وارون متناسب است ($T \propto ۱/\sqrt{k}$).

پ) دورهٔ تناوب سامانه جرم ــ فنر مستقل از دامنه است.

محاسبات و همچنین آزمایش‌هایی مشابه با آنچه در فعالیت ۳ــ۲ دیدید نشان می‌دهد دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم‌ــفنر با وزنه‌ای به جرم m و فنری با ثابت k برابر است با :

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad \text{(دورهٔ تناوب سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۴)$$

بسامد زاویه‌ایِ ω را نیز می‌توانیم از رابطهٔ $\omega = ۲\pi/T$ به دست آوریم :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{(بسامد زاویه‌ای سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۵)$$

مثال ۳ــ۲

قطعه‌ای به جرم $۶۸۰\,g$ به فنری با ثابت فنر $k = ۶۵\,N/m$ بسته شده است. قطعه را به اندازهٔ مشخصی از مکان تعادل خود روی یک سطح افقی بدون اصطکاک می‌کشیم و از حالت سکون رها می‌کنیم. الف) دورهٔ تناوب و ب) بسامد زاویه‌ای نوسان چقدر می‌شود؟

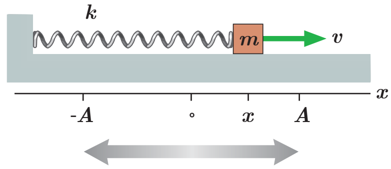
پاسخ : الف) دورهٔ تناوب با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۴ به‌دست می‌آید :

$$T = ۲\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = ۲\pi\sqrt{\frac{۰/۶۸۰\,kg}{۶۵\,N/m}} = ۰/۶۴\,s$$

ب) بسامد زاویه‌ای از رابطهٔ ۳ــ۵ به‌دست می‌آید :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{۶۵\,N/m}{۰/۶۸۰\,kg}} = ۹/۸\ rad/s$$

۳ــ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده

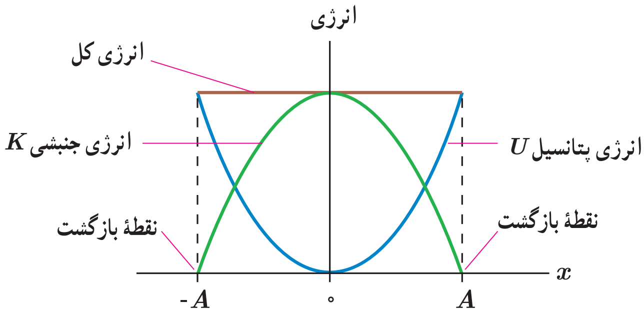


شکل ۳ــ۶ سامانهٔ جرم ــ فنر در نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک

شکل ۳ــ۶ سامانهٔ جرم ــ فنری را هنگام نوسان روی سطح افقی بدون اصطکاک نشان می‌دهد. این سامانه مثال بارز حرکت هماهنگ ساده است. در کتاب فیزیک ۱ دیدید وقتی فنری فشرده یا کشیده می‌شود در سامانهٔ جرم ــ فنر انرژی پتانسیل کشسانی ذخیره می‌شود، به‌طوری که با افزایش جابه‌جایی از نقطهٔ تعادل (جایی که فنر نه فشرده و نه کشیده شده است) این انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد. بنابراین انرژی پتانسیل سامانهٔ جرم ــ فنر در نقاط بازگشتی ($x=\pm A$) بیشینه و در نقطهٔ تعادل ($x=0$) برابر صفر است.

انرژی جنبشی این سامانه نیز به جرم قطعهٔ متصل به فنر و تندی آن بستگی دارد و برابر با $K=\frac{1}{2}mv^2$ است. با افزایش جابه‌جایی از نقطهٔ تعادل، تندی کاهش می‌یابد و انرژی جنبشی سامانه نیز کم می‌شود، طوری که در نقاط بازگشتی $x=\pm A$ که تندی صفر می‌شود انرژی جنبشی سامانه به صفر می‌رسد. بیشینهٔ تندی در نقطهٔ تعادلِ $x=0$ رخ می‌دهد و بنابراین انرژی جنبشی نیز در این نقطه بیشینه می‌شود.

در فیزیک ۱ آموختیم که انرژی مکانیکی این سامانه برابر با مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل آن است ($E=K+U$). چون سطح بدون اصطکاک است، انرژی مکانیکی سامانه پایسته می‌ماند و بنابراین مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل در نقاط بازگشتی، نقطهٔ تعادل، و هر نقطهٔ دلخواه دیگری از مسیر با هم برابر است. به همان اندازه که با افزایش جابه‌جایی از نقطهٔ تعادل، انرژی پتانسیل افزایش می‌یابد، انرژی جنبشی کاهش می‌یابد و بالعکس. شکل ۳ــ۷ تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر و پایستگی انرژی مکانیکی در حرکت هماهنگ سادهٔ سامانهٔ جرم ــ فنر را نشان می‌دهد.



شکل ۳ــ۷ تبدیل انرژی در حین حرکت هماهنگ سادهٔ سامانهٔ جرم ــ فنر. توجه کنید که در نقطهٔ $x=0$ انرژی، صرفاً جنبشی و در نقطه‌های $x=\pm A$ انرژی، صرفاً پتانسیل است. در این حرکت انرژی مکانیکی پایسته است، به گونه‌ای که به‌طور پیوسته از انرژی پتانسیل U به انرژی جنبشی K تبدیل می‌شود و بالعکس.

نشان داده می‌شود که انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر در حرکت هماهنگ ساده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید[1] :

$$E=\frac{1}{2}kA^2 \qquad \text{(انرژی مکانیکی سامانهٔ جرم ــ فنر)} \qquad (۳ــ۶)$$

که در آن k ثابت فنر و A دامنهٔ نوسان است. با استفاده از رابطه‌های ۳ــ۵ و ۳ــ۳ به رابطهٔ مفید دیگری می‌رسیم که برای هر نوسانگر هماهنگ سادهٔ دیگری از جمله آونگ ساده نیز

۱ــ انرژی پتانسیل کشسانی سامانهٔ جرم ــ فنر در هر نقطه از مسیر نوسان از رابطهٔ $U=\frac{1}{2}kx^2$ به‌دست می‌آید که آموزش و ارزشیابی آن خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است. در نقاط بازگشتی که $x=\pm A$ است، این انرژی مساوی $\frac{1}{2}kA^2$ و برابر با انرژی مکانیکی سامانه است.

برقرار است :

$$E = \frac{۱}{۲}kA^۲ = \frac{۱}{۲}m\omega^۲A^۲ = ۲\pi^۲mA^۲f^۲$$

یا

(۳ــ۷) (انرژی مکانیکی نوسانگر هماهنگ ساده) $E = ۲\pi^۲ mA^۲f^۲$

اگرچه پایستگی انرژی مکانیکی و تبدیل انرژی‌های جنبشی و پتانسیل به یکدیگر را فقط برای نوسانگر جرم ــ فنر بررسی کردیم، ولی می‌توان نشان داد در حالت کلی، برای هرگونه نوسانگر هماهنگ سادهٔ دیگری (از جمله آونگ ساده) نیز برقرار است. همچنین بنا به رابطهٔ ۳ــ۷ انرژی مکانیکی هر نوسانگر هماهنگ ساده‌ای متناسب با مربع دامنه ($A^۲$) و مربع بسامد ($f^۲$) است.

مثال ۳ــ۳

الف) نشان دهید تندی بیشینه در حرکت هماهنگ ساده برابر است با $A\omega$.

ب) تندی نوسانگر هماهنگ ساده‌ای که با دامنهٔ ۱۰cm و دورهٔ ۰/۵۰s نوسان می‌کند هنگام عبور از نقطهٔ تعادل چقدر است؟

پاسخ : الف) بیشینهٔ تندی در حرکت هماهنگ ساده هنگام عبور نوسانگر از نقطهٔ تعادل رخ می‌دهد، جایی که انرژی پتانسیل صفر است. با استفاده از تعریف انرژی مکانیکی ($E = K + U$) و همچنین رابطه‌های ۳ــ۷ و ۳ــ۳ خواهیم داشت :

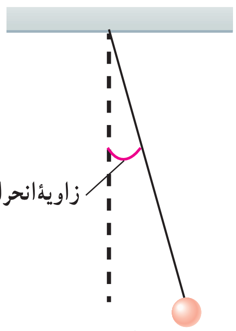
$$۲\pi^۲mA^۲f^۲ = \frac{۱}{۲}mv_{max}^۲ + ۰ \Rightarrow v_{max} = ۲\pi Af = A\omega$$

ب)

$$v_{max} = A\omega = A(\frac{۲\pi}{T}) = (۰/۱۰m)(\frac{۲\pi}{۰/۵۰s}) = ۱/۳\,m/s$$

آونگ ساده : آونگ ساده شامل وزنهٔ کوچکی به جرم m (موسوم به وزنهٔ آونگ) است که از نخی بدون جرم و کش‌نیامدنی به طول L که سر دیگر آن ثابت شده، آویزان است (شکل ۳ــ۸). اگر زاویهٔ انحراف آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، آونگ حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت و همان تبدیل‌های انرژی نوسانگر هماهنگ ساده در اینجا نیز رخ می‌دهد.

آزمایش‌های متعدد و محاسبه، نشان می‌دهد دورهٔ تناوب آونگ ساده فقط به شتاب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :



شکل ۳ــ۸ آونگ ساده، شامل وزنه‌ای کوچک است که از نخی بدون جرم و کش نیامدنی آویزان است.

(۳ــ۸) (دورهٔ تناوب آونگ ساده) $T = ۲\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$

این رابطه نشان می‌دهد که دورهٔ تناوب آونگ ساده به جرم و دامنهٔ آن بستگی ندارد.

مثال ۳ــ۴

بستگی دورهٔ تناوب آونگ به شتاب گرانشی، روش دقیقی را برای تعیین g به‌دست می‌دهد. در این روش با اندازه‌گیری طول L و دورهٔ تناوب T، می‌توان g را به‌دست آورد. ژئوفیزیک‌دانی با استفاده از یک آونگ ساده به طول ۰/۱۷۱m که ۷۲/۰ نوسان کامل را در ۶۰/۰s انجام می‌دهد، شتاب g زمین را در مکانی خاص تعیین می‌کند. وی مقدار g را در این مکان چقدر به‌دست می‌آورد؟

پاسخ : رابطهٔ دورهٔ تناوب آونگ ساده را برای g حل می‌کنیم :

$$g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}$$

که در آن T دورهٔ تناوب این آونگ است :

$$T=\frac{\text{زمان}}{\text{تعداد نوسان‌ها}}=\frac{60/0\,s}{72/0}=0/833\,s$$

در نتیجه g چنین به‌دست می‌آید :

$$g=\frac{4\pi^2 L}{T^2}=\frac{4\pi^2(0/171\,m)}{(0/833\,s)^2}=9/73\,m/s^2$$

۳ــ۴ تشدید

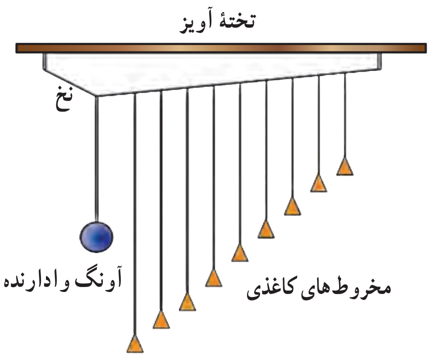


شکل ۳ــ۹ با هُل دادن تاب، کودک به نوسان واداشته می‌شود.

در تمام مثال‌هایی که تا اینجا بررسی کردیم، نوسانگر (مثلاً جرم ــ فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل با بسامدی معیّن شروع به نوسان می‌کرد. به بسامد این نوسان‌ها بسامد طبیعی گفته می‌شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانهٔ جرم ــ فنر $f_0=\sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_0=\sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان واداشته گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند[1]. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هُل داده می‌شود (شکل ۳ــ۹). نوسان تاب بی‌آنکه در ادامهٔ حرکت هُل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است، به طوری که نوسان‌های تاب، میرا و سرانجام متوقف می‌شود. ولی وقتی شخصی تاب را هُل می‌دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می‌کند و مانع از میراشدن نوسان تاب می‌شود. اگر دامنهٔ نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان‌های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d=f_0$) اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهایی بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هُل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هل می‌دهیم. پدیدهٔ تشدید را می‌توان با فعالیت سادهٔ زیر بررسی کرد.

فعالیت ۳ــ۳

آونگ‌های بارتون[2] : یک آونگ با وزنهٔ سنگین و تعدادی آونگ سبک با طول‌های متفاوت را مطابق شکل سوار کنید. آونگ‌ها روی نخی سوار شده‌اند که هر دو انتهای آن توسط گیره‌هایی به تختهٔ آویز متصل شده است. به آونگ سنگین اصطلاحاً *آونگ وادارنده*[3] گفته می‌شود، زیرا به نوسان درآوردن این آونگ در صفحهٔ عمود بر صفحهٔ شکل، موجب تاب خوردن نخ آویز و در نتیجه به نوسان واداشتن سایر آونگ‌ها می‌شود. آونگ وادارنده را به نوسان درآورید و آنچه را مشاهده می‌کنید توضیح دهید.



۱ــ شاخص پایین d سرواژهٔ driven به معنی واداشته است.

۲ــ Barton’s Pendulums

۳ــ Driver Pendulum

تمرین ۳ــ۳

طول تعدادی آونگ ساده که از میله‌ای افقی آویزان‌اند، عبارت‌اند از، ۰/۴۰m، ۰/۸۰m، ۱/۲m، ۲/۸m، ۳/۵m. فرض کنید میله دستخوش نوسان‌هایی افقی با بسامد زاویه‌ای در گسترهٔ ۲/۰ rad/s تا ۴/۰ rad/s بشود. کدام آونگ‌ها با دامنهٔ بزرگ‌تری به نوسان درمی‌آیند؟ (توجه کنید گرچه تشدید در بسامد مشخصی رخ می‌دهد، اما دامنهٔ نوسان در نزدیک این بسامد همچنان بزرگ است).

پرسش ۳ــ۲

در پی زمین‌لرزهٔ عظیمی (به بزرگی ۸/۱ در مقیاس *ریشتر*) که در ساحل غربی مکزیک در سال ۱۹۸۵ اتفاق افتاد ساختمان‌های نیمه‌بلند فرو ریختند، ولی ساختمان‌های کوتاه‌تر و بلندتر پابرجا ماندند. علت این پدیده را توضیح دهید.


(الف)


(ب)

الف) ساختمان‌های کوتاه و ب) ساختمان‌های بلند، در زمین‌لرزهٔ مکزیکوسیتی بر جای ماندند.

۳ــ۵ موج و انواع آن

هر گاه در ناحیه‌ای از یک محیط کشسان، ارتعاشی به‌وجود آید، موجب پدید آمدن ارتعاش‌های پی‌درپی دیگری می‌شود که از محل شروع ارتعاش دور و دورترند و به این ترتیب آنچه که موج مکانیکی می‌نامند، به‌وجود می‌آید. معمولاً موج‌ها را به دو دسته تقسیم‌بندی می‌کنند: موج‌های مکانیکی و موج‌های الکترومغناطیسی. موج‌های مکانیکی ــ مانند موج‌های روی سطح آب (شکل ۳ــ۱۰) و موج‌های صوتی ــ برای انتشار خود به یک محیط مادی نیاز دارند و موج‌های الکترومغناطیسی ــ مانند نور مرئی، موج‌های رادیویی و تلویزیونی، میکروموج و پرتوهای x ــ برای انتشار خود به محیط مادی نیاز ندارند.

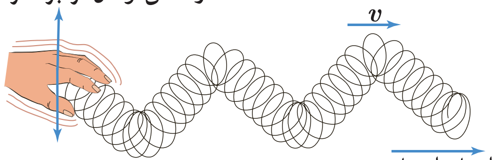
به‌رغم متفاوت بودن منشأ امواج مکانیکی و الکترومغناطیسی، همگی آنها مشخصه‌های یکسانی دارند و رفتار آنها از قاعده‌هایی کلی پیروی می‌کند که در هر پدیدهٔ موجی برقرار است.

اگر مانند شکل ۳ــ۱۱ یک سر فنر بلند[1] کشیده شده‌ای را به‌سرعت به چپ و راست تکان دهید، موجی به شکل یک تپ در طول فنر منتشر می‌شود. وقتی سرِ آزاد فنر را مانند شکل ۳ــ۱۲ رو به بالا حرکت می‌دهید، بخش مجاور آن نیز از طریق کشش بین این دو بخش شروع به بالا رفتن می‌کند. وقتی بخش مجاور به بالا حرکت کند، این بخش نیز به نوبهٔ خود شروع به بالا کشیدن بخش بعدی می‌کند و این روند ادامه می‌یابد. به همین ترتیب، پایین کشیدن سر آزاد فنر


شکل ۳ــ۱۰ با پرتاب سنگ در آب، فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی دایره‌ای شکل بر سطح آب پخش می‌شوند.


شکل ۳ــ۱۱ نمایش ایجاد موج در یک فنر بلند کشیده

۱ــ به این فنر، فنر اسلینکی (Slinky) می‌گویند.



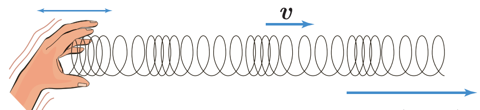
شکل ۳ـ۱۲ در حالی که موج به سمت راست منتشر می‌شود هر جزء فنر عمود بر راستای انتشار موج، به بالا و پایین نوسان می‌کند.

موجب پایین کشیده شدن بخش‌های بعدی فنر می‌شود، و بدین ترتیب آشفتگی‌ای در شکل فنر ایجاد می‌شود که با تندی v در طول فنر حرکت می‌کند. اگر دست خود را پیاپی به بالا و پایین حرکت دهید یک موج پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور موج به بالا و پایین نوسان می‌کند دقت کنید درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر، عمود بر جهت حرکت موج است، که به آن، موج عرضی گفته می‌شود.

از این فنر بلند می‌توان برای ایجاد نوع دیگری از موج موسوم به موج طولی نیز استفاده کرد. اگر این بار، سرِ آزاد فنر را به جای اینکه به بالا و پایین یا به چپ و راست حرکت دهید، به‌سرعت به جلو و عقب ببرید، یک تپ در طول فنر به راه می‌افتد (شکل ۳ـ۱۳) و اگر دست خود را پیاپی به جلو و عقب حرکت دهید یک موج طولی پیوسته با تندی v در طول فنر به حرکت درمی‌آید. اگر به حرکت جزئی از فنر که در هنگام عبور این موج به چپ و راست نوسان می‌کند دقت کنید، درمی‌یابید جابه‌جایی هر جزء نوسان‌کننده‌ای از فنر در راستای حرکت موج است (شکل ۳ـ۱۴). به همین دلیل است که به چنین موجی، موج طولی می‌گویند.



شکل ۳ـ۱۳ نمایش ایجاد یک تپ طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده



شکل ۳ـ۱۴ درحالی‌که موج به سمت راست حرکت می‌کند، هر حلقهٔ فنر همراستا با حرکت موج به چپ و راست نوسان می‌کند، به‌طوری‌که ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شود.

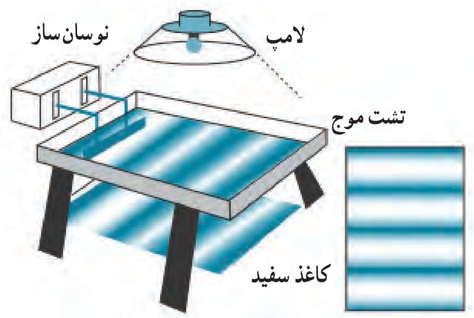
به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، موج‌های پیش‌رونده گفته می‌شود. زیرا، هر دوی این موج‌ها از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند. توجه کنید *این موج است که از یک سر به سر دیگر حرکت می‌کند نه ماده‌ای (در مثال‌های بالا فنر) که موج در آن حرکت می‌کند*. همچنین دریافتید که برای ایجاد چنین امواجی به یک جسم (چشمهٔ) نوسانی نیاز دارید و موج از این چشمه دور می‌شود، و اگر چشمه به‌طور هماهنگ ساده نوسان کند، اجزای محیط حول نقطهٔ تعادل خود با همان بسامد چشمه نوسان می‌کنند.

پرسش ۳ـ۳

همان‌طور که گفتیم یکی از ویژگی‌های موج پیش‌رونده انتقال انرژی از یک نقطه به نقطهٔ دیگر، در جهت انتشار موج است. با در نظر گرفتن یک تپ طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده، این ویژگی را توضیح دهید.

۳ـ۶ مشخصه‌های موج

برای مطالعهٔ برخی از مشخصه‌های موج از وسیله‌ای موسوم به *تشت موج*[1] استفاده می‌شود. طرح ساده‌ای از این وسیله در شکل ۳ـ۱۵ نشان داده شده است. این وسیله شامل یک تشت شیشه‌ای کم‌عمق و یک نوسان‌ساز است. یک راه مشاهدهٔ رفتار موج، استفاده از سایه‌ای است که توسط لامپ از سطح آب داخل تشت بر ورقهٔ کاغذیِ زیر تشت تشکیل می‌شود. برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های موج



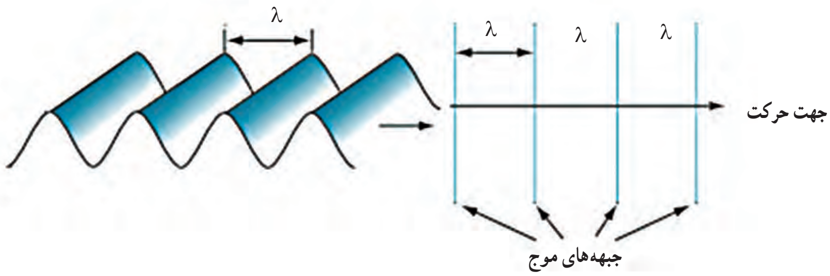
شکل ۳ـ۱۵ طرحی از دستگاه تشت موج

۱ـ Ripple tank

روی سطح آب، به‌وضوح در سایهٔ تشکیل شده بر ورقهٔ کاغذ دیده می‌شود. اگر مانند شکل ۳ــ۱۵، تیغه‌ای را بر سطح آب به نوسان درآوریم، موجی تخت بر سطح آب تشکیل می‌شود و اگر به جای تیغه از یک گوی کوچک استفاده کنیم به یک موج دایره‌ای می‌رسیم که از نقطهٔ تماس با سطح آب در تمام جهت‌ها حرکت می‌کند (شکل ۳ــ۱۶). در هر دو حالت، به هر یک از برآمدگی‌ها یا فرورفتگی‌های ایجادشده روی سطح آب، یک **جبههٔ موج** می‌گویند. به برآمدگی‌ها، **قلّه** (ستیغ) و به فرورفتگی‌ها **درّه** (پاستیغ) گفته می‌شود. فاصلهٔ بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، **طول‌موج** نامیده می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند (شکل ۳ــ۱۷). طول‌موجِ λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دورهٔ تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.



شکل ۳ــ۱۶ تشکیل امواج دایره‌ای بر سطح آب یک تشت موج



شکل ۳ــ۱۷ طرحی از تشکیل جبهه‌های موج تخت بر سطح آب یک تشت موج.
جبهه‌های موج، روشی مناسب برای نمایش یک موج پیش‌رونده هستند.

با استفاده از آنچه برای موج سطحی در تشت موج آموختیم سایر مشخصه‌های این موج را نیز می‌توانیم معرفی کنیم.

دامنه (A) : بیشینهٔ فاصلهٔ یک ذره از مکان تعادل، *دامنهٔ موج* نامیده می‌شود که همان فاصلهٔ قله یا دره نسبت به سطح آرام یا ساکن است.

دورهٔ تناوب (T) : مدت زمانی که هر ذرهٔ محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد *دورهٔ تناوب* موج نامیده می‌شود که برابر با زمانی است که چشمهٔ موج یک نوسان کامل انجام می‌دهد.

بسامد (f) : تعداد نوسان‌های انجام شده توسط هر ذرهٔ محیط در یک ثانیه *بسامد* موج نامیده می‌شود که برابر با بسامد چشمهٔ موج نیز هست. بنابراین $f=\frac{1}{T}$.

تندی انتشار موج (v) : اگر جبههٔ موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطهٔ $v=\frac{L}{\Delta t}$ به‌دست می‌آید. از آنجا که طول‌موج λ در دورهٔ T طی می‌شود، داریم :

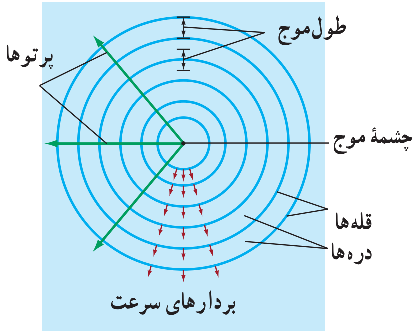
$$v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f \qquad \text{(تندی انتشار موج)} \qquad (۳ــ۹)$$

تجربه و محاسبات نظری نشان می‌دهد که تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد.

مثال ۳ــ۵

امواج دایره‌ای تشکیل شده بر سطح آب تشت موج شکل ۳ــ۱۶ را در نظر بگیرید. آزمایش نشان داده است اگر گوی متحرک با دورهٔ تناوب $1/0\,s$ در تشتی به عمق $2/5\,cm$ نوسان کند، فاصلهٔ بین دو برآمدگی مجاور $50\,cm$ و اگر در تشتی به عمق $3/5\,cm$ نوسان کند، این فاصله $60\,cm$ می‌شود. تندی انتشار موج سطحی در این تشت در هر حالت چقدر است؟ از این محاسبه چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

پاسخ : فاصلهٔ دو برآمدگی مجاور، طول‌موج است و همان‌طور که پیش‌تر گفتیم دورهٔ تناوب موج برابر با دورهٔ تناوب نوسان‌های چشمهٔ موج است. تندی انتشار موج را با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۹ به‌دست می‌آوریم.



با قرار دادن $\lambda_1 = 0/50\,m$ و $T = 1/0\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

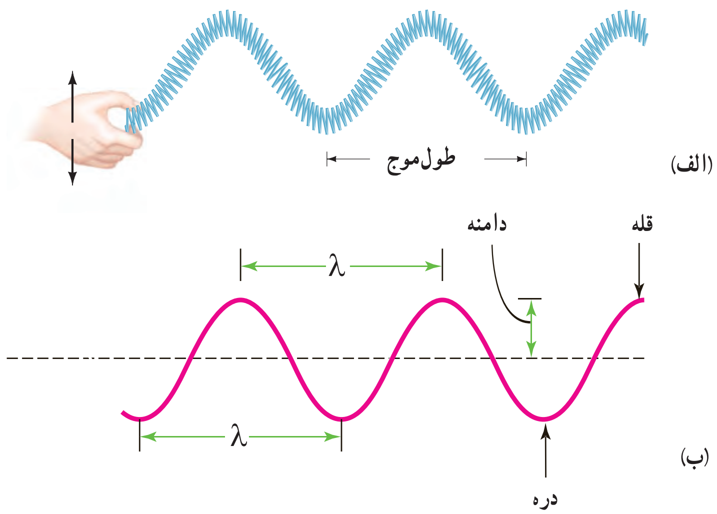
$$v_1 = \frac{\lambda_1}{T} = \frac{0/50\,m}{1/0\,s} = 0/50\,m/s$$

و با قرار دادن $\lambda_2 = 0/60\,m$ و $T = 1/0\,s$ در رابطهٔ ۳ــ۹ خواهیم داشت :

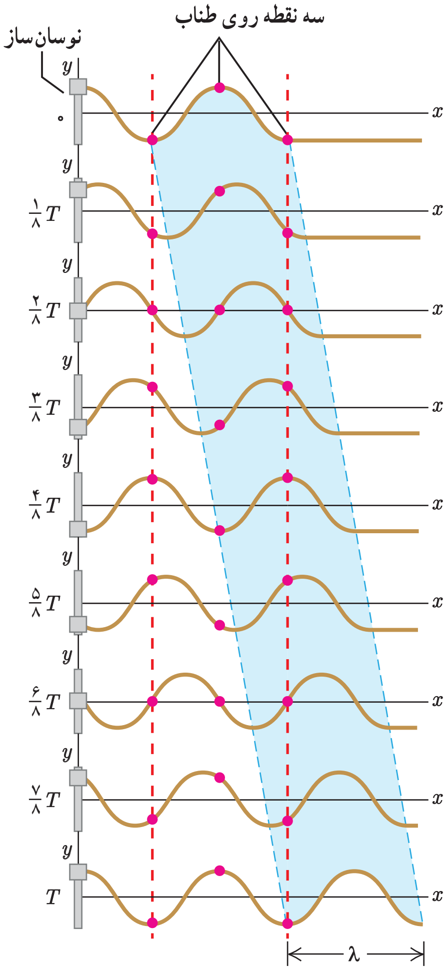
$$v_2 = \frac{\lambda_2}{T} = \frac{0/60\,m}{1/0\,s} = 0/60\,m/s$$

از اینجا درمی‌یابیم که تندی انتشار موج سطحی روی آب‌های کم‌عمق، به عمق آب که یکی از ویژگی‌های محیط انتشار موج است بستگی دارد.

موج عرضی و مشخصه‌های آن : اگر یک سر فنر بلند کشیده‌شده‌ای را با حرکت هماهنگ ساده، پیاپی به بالا و پایین حرکت دهید موج عرضی پیوسته‌ای در طول فنر منتشر می‌شود (شکل ۳ــ۱۸ الف). امواج عرضی، همانند موج عرضی ایجاد شده در این فنر، در هر لحظه از زمانِ انتشار موج را می‌توان با شکل موجی سینوسی مانند شکل ۳ــ۱۸ ب مدل‌سازی کرد. در این شکل طول‌موج و دامنهٔ این موج عرضی، نیز نشان داده شده است.



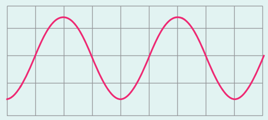
شکل ۳ــ۱۸ الف) یک موج عرضی در فنر کشیده شده و ب) مدل سینوسی برای این موج

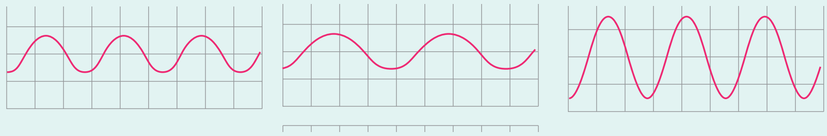


شکل ۳ــ۱۹ نُه عکس لحظه‌ای از یک موج عرضی منتشر شده در یک تار کشیده شده

پرسش ۳ــ۴

شکل روبه‌رو موجی عرضی را نشان می‌دهد. دامنه و طول‌موج هر کدام از شکل موج‌های الف)، ب) و پ) را با دامنه و طول‌موج این شکل مقایسه کنید.





شکل ۳ــ۱۹، نقش یک موج عرضی را در چند لحظهٔ متفاوت در مدت یک دورهٔ تناوب (T) نشان می‌دهد. در این مدت، هر ذره از محیط یک نوسان کامل انجام داده است و موج به اندازهٔ یک طول‌موج (λ) پیشروی کرده است. بنابراین تندی انتشار موج عرضی نیز از همان رابطهٔ ۳ــ۹ به‌دست می‌آید.

همان‌طور که پیش از این گفتیم تندی انتشار موج به جنس و ویژگی‌های محیط انتشار بستگی دارد. برای مثال، تندی انتشار موج عرضی در یک فنر، تار یا ریسمان کشیده به نیروی کشش (F) و چگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \qquad \text{(تندی انتشار موج عرضی در تار یا فنر)} \qquad (۳ــ۱۰)$$

مثال ۳ــ۶



فنری به جرم $۰/۶۰\,\text{kg}$ و طول $۴/۰\,\text{m}$ را با نیروی $۱/۲\text{N}$ می‌کشیم. الف) تندی انتشار موج در این فنر چقدر است؟ ب) سر آزاد فنر را با چه بسامدی تکان دهیم تا طول موج ایجاد شده در فنر $۱/۰\,\text{m}$ شود؟

پاسخ: الف) با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۱۰ تندی انتشار موج را به‌دست می‌آوریم. در اینجا $F = ۱/۲\text{N}$ است و چگالی خطی جرم برابر است با:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{۰/۶۰\,\text{kg}}{۴/۰\,\text{m}} = ۰/۱۵\,\text{kg/m}$$

بنابراین تندی انتشار v چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{۱/۲\,\text{N}}{۰/۱۵\,\text{kg/m}}} = ۲/۸۳\ \text{m/s} \simeq ۲/۸\text{m/s}$$

ب) با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۹ بسامد f را به‌دست می‌آوریم:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{۲/۸۳\,\text{m/s}}{۱/۰\,\text{m}} = ۲/۸۳\,\text{Hz} \simeq ۲/۸\,\text{Hz}$$

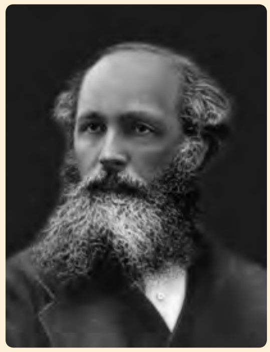
تمرین ۳ــ۴



در سازهای زهی همانند تار، کمانچه و گیتار با سفت یا شُل کردن تار، تندی انتشار موج عرضی در تار تغییر می‌کند. در یک گیتار طول هر تار بین دو انتهای ثابت ۰/۶۲۸m است. برای نواختن بالاترین بسامد، جرم تار ۰/۲۰۸g و برای نواختن پایین‌ترین بسامد، جرم تار ۳/۳۲g است. تارها تحت کشش برابر ۲۲۶N قرار دارند. تندی انتشار موج برای ایجاد این دو بسامد چقدر است؟

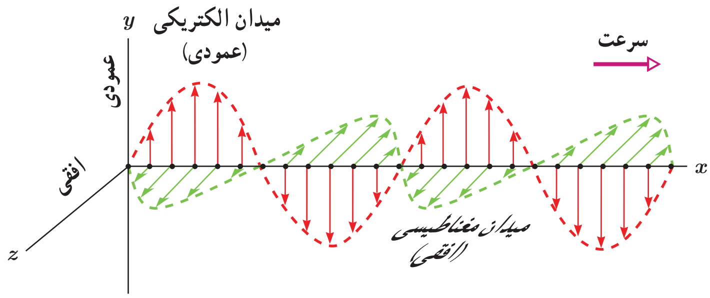
انتقال انرژی در موج عرضی : هر موجی حامل انرژی است. وقتی در یک ریسمان یا فنر کشیده موجی عرضی را ایجاد می‌کنیم، در واقع، انرژی را برای ایجاد موج در ریسمان فراهم کرده‌ایم. با انتشار موج، این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی و پتانسیل در ریسمان انتقال می‌یابد. انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل لازم برای حرکت و کشیدگی هر جزء ریسمان یا فنر را شخصی تأمین می‌کند که سر ریسمان یا فنر را دائماً به نوسان درمی‌آورد. ثابت می‌شود مقدار متوسط آهنگ انتقال انرژی (توان متوسط) در یک موج سینوسی برای همهٔ انواع امواج مکانیکی با مربع دامنه (A^2) و نیز مربع بسامد (f^2) موج متناسب است.

امواج الکترومغناطیسی : در کتاب فیزیک ۲ آموختیم که بار الکتریکی، میدان الکتریکی ایجاد می‌کند و جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. اگر بارهای الکتریکی ساکن باشند، میدان الکتریکی حاصل از آنها با زمان تغییر نمی‌کند. به همین ترتیب اگر جریان الکتریکی ثابت باشد، میدان مغناطیسی حاصل از آن ثابت و بدون تغییر می‌شود. امواج الکترومغناطیسی از رابطهٔ متقابل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌وجود می‌آیند. یعنی هر تغییری در میدان الکتریکی در هر نقطه از فضا، میدان مغناطیسی متغیری ایجاد می‌کند و این میدان مغناطیسی متغیر، خود میدان الکتریکی متغیری به‌وجود می‌آورد. این رابطهٔ متقابل میدان‌ها سبب انتقالِ نوسان‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی از یک نقطهٔ فضا به نقاط دیگر و یا همان انتشار موج الکترومغناطیسی می‌شود. ایجاد میدان الکتریکی به علت تغییر میدان مغناطیسی همان القای الکترومغناطیسی است که در سال ۱۸۳۱ میلادی توسط مایکل فاراده به‌طور تجربی کشف شد و در کتاب فیزیک ۲ با آن آشنا شدید. پدیدهٔ معکوس این اثر، یعنی تولید میدان مغناطیسی بر اثر تغییر میدان الکتریکی بعدها توسط جیمز کلارک ماکسول، فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۶۵ میلادی پیش‌بینی شد. ماکسول از این دو پدیده نتیجه گرفت که امواج الکترومغناطیسی باید لزوماً ناشی از تغییرات هم‌زمانِ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (اصطلاحاً میدان الکترومغناطیسی) باشد. شکل ۳ــ۲۰، یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در لحظه‌ای از زمان و در نقطه‌ای دور از چشمهٔ تولید موج نشان می‌دهد.



جیمز کلارک ماکسول (۱۸۷۹ــ۱۸۳۱ م.)

در شهر ادینبورگ اسکاتلند زاده شد. جیمز در دوران دانش‌آموزی بسیار کنجکاو بود و به ساختن اسباب‌ها و دستگاه‌های فنّی خیلی علاقه داشت و پدرش هم او را به این کار تشویق می‌کرد. وی در دانشگاه‌های ادینبورگ و کمبریج تحصیل نمود. ماکسول قدرت شگرفی در تجزیه و تحلیل مسائل ریاضی داشت و با استفاده از روش‌های ریاضی توانست روی حلقه‌های سیارهٔ زحل و همچنین نظریهٔ جنبشی گازها مطالعات ارزنده‌ای انجام دهد. در سال ۱۸۶۵ کتاب معروف وی تحت عنوان «نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی» به چاپ رسید و انتشار این کتاب کمک‌های فراوانی به علم و فناوری کرد و راه جدیدی را بر روی دستگاه‌هایی مانند رادیو، تلویزیون، رادار و غیره گشود که همگی بر اساس امواج الکترومغناطیس کار می‌کنند.



شکل ۳ــ۲۰ یک تصویر لحظه‌ای از موجی الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (z) و انتشار موج در جهت x است.

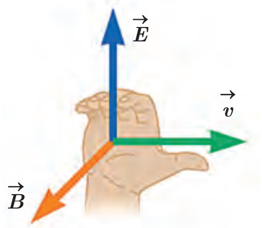
چند مشخصهٔ بارز چنین موجی به قرار زیر است :

۱ــ میدان الکتریکی $\vec{E}$ همواره عمود بر میدان مغناطیسی $\vec{B}$ است.

۲ــ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی $\vec{E}$ و $\vec{B}$ همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.

۳ــ میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.

جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان مطابق شکل ۳ــ۲۱ از قاعدهٔ دست راست تعیین کرد.



شکل ۳ــ۲۱ قاعدهٔ دست راست برای یافتن جهت انتشار موج الکترومغناطیسی

پرسش ۳ــ۵

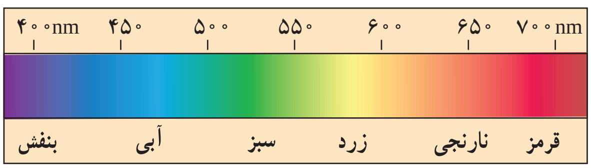
در یک لحظهٔ خاص، میدان الکتریکی مربوط به یک موج الکترومغناطیسی در نقطه‌ای از فضا در جهت $+z$ و میدان مغناطیسی مربوط به آن در جهت $+y$ است. جهت انتشار در کدام سو است؟ (جهت‌های $+x$، $+y$ و $+z$ را مانند شکل ۳ــ۲۰ در نظر بگیرید.)

ماکسول با یک تحلیل ریاضی نشان داد که تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطهٔ $c=\frac{۱}{\sqrt{\mu_\circ \varepsilon_\circ}}$ به‌دست می‌آید، که در آن $\mu_\circ$ تراوایی مغناطیسی خلأ و برابر $۴\pi\times۱۰^{-۷}\mathrm{T.m/A}$ و $\varepsilon_\circ$ ضریب گذردهی الکتریکی خلأ و برابر $۸/۸۵\times۱۰^{-۱۲}\mathrm{C^۲/N.m^۲}$ است. مقدار c با استفاده از این رابطه $۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s}$ می‌شود که همان تندی انتشار نور در خلأ است که پیش‌تر توسط فیزیک‌دان فرانسوی آرماند لوئیس فیزو (۱۸۹۶ــ ۱۸۱۹م.) به روش تجربی به‌دست آمده بود. این نتیجه‌ای بسیار مهم بود، زیرا نشان می‌داد نور، یک موج الکترومغناطیسی است.

نظریهٔ ماکسول نیاز به تأیید تجربی داشت. هاینریش هرتز در سال ۱۸۸۸ میلادی با ایجاد نوسان‌های الکتریکی پُر بسامدی، آزمایش‌های مشهوری در تأیید نظریهٔ ماکسول انجام داد. هرتز نشان داد که امواج رادیویی نیز با همان تندی نور مرئی در آزمایشگاه حرکت می‌کنند و این حاکی از سرشت یکسان امواج رادیویی و نور مرئی بود.

مثال ۳ــ۷

گسترهٔ تقریبی طول‌موج نور مرئی در خلأ از ۴۰۰nm (نور بنفش) تا ۷۰۰nm (نور قرمز) است. گسترهٔ بسامد مربوط به نور مرئی را بر حسب هرتز تعیین کنید.



پاسخ : نور یک نوع موج است و برای آن می‌توان از رابطهٔ $v=f\lambda$ استفاده کرد. اما برای این موج v برابر با تندی نور $(c=۳/۰۰\times۱۰^{۸}\mathrm{m/s})$ است. بنابراین برای دو حد بالا و پایین بسامد طیف نور مرئی به‌ترتیب داریم :

$$f_{\text{بنفش}}=\frac{c}{\lambda_{\text{بنفش}}}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\mathrm{m/s}}{۴۰۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{m}}=۷/۵\times۱۰^{۱۴}\,\mathrm{Hz}$$

$$f_{\text{قرمز}}=\frac{c}{\lambda_{\text{قرمز}}}=\frac{۳/۰۰\times۱۰^{۸}\,\mathrm{m/s}}{۷۰۰\times۱۰^{-۹}\,\mathrm{m}}=۴/۳\times۱۰^{۱۴}\,\mathrm{Hz}$$

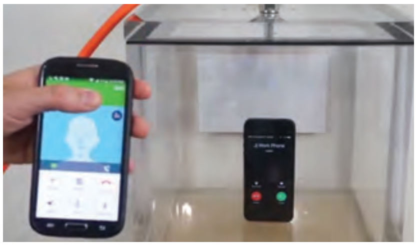
تمرین ۳ـ۵

طول آنتن یک گوشی تلفن همراه قدیمی معمولاً $\frac{۱}{۴}$ طول‌موج دریافتی است. اگر طول چنین آنتنی تقریباً برابر ۸/۵cm باشد بسامدی را که این گوشی با آن کار می‌کند تعیین کنید.



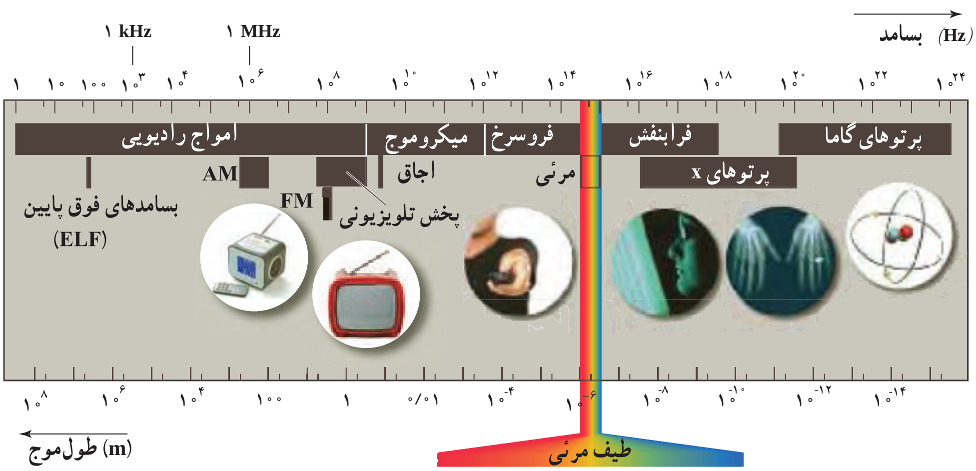
فعالیت ۳ـ۴

مطابق شکل روبه‌رو یک گوشی تلفن همراه را در یک محفظهٔ تخلیهٔ هوای شیشه‌ای آویزان کنید. با برقراری تماس با گوشی، صدای آن را خواهید شنید. ولی با به‌کار افتادن پمپ تخلیهٔ هوا، صدا به‌تدریج ضعیف و سرانجام خاموش می‌شود، در حالی‌که امواج الکترومغناطیسی همچنان به گوشی می‌رسند. از این آزمایش چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



همان‌طور که پیش‌تر گفتیم امواج مکانیکی برای انتشار به محیط مادی نیاز دارند. اما انتشار امواج الکترومغناطیسی به محیط مادی نیاز ندارد و این امواج، انرژی را نه به‌صورت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ذرات محیط، بلکه به‌صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند. مثلاً کل انرژی دریافتی از خورشید که باعث بقای زندگی روی کرهٔ زمین می‌شود از نوع امواج الکترومغناطیسی است. با اینکه خورشید در فاصلهٔ ۱۵۰ میلیون کیلومتری از زمین قرار دارد، توان امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از خورشید که به سطح زمین می‌رسد، تقریباً ۱۰۰ میلیون گیگاوات است. جالب است که بدانید مرتبهٔ بزرگی توان تولیدی یک نیروگاه هسته‌ای، ۱ گیگاوات است.

طیف امواج الکترومغناطیسی : امروزه طیف وسیعی از امواج الکترومغناطیسی را می‌شناسیم. این طیف شامل امواج رادیویی، میکروموج، فروسرخ، طیف نور مرئی، فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای گاما است، که از کمترین بسامد تا بیشترین بسامد گسترده شده‌اند (شکل ۳ـ۲۲). تمام این امواج به‌رغم تفاوت فراوان در روش‌های تولید و کاربردهای آنها، امواجی الکترومغناطیسی هستند و همگی با تندی نور در خلأ حرکت می‌کنند و هیچ گسستگی‌ای در این طیف وجود ندارد.



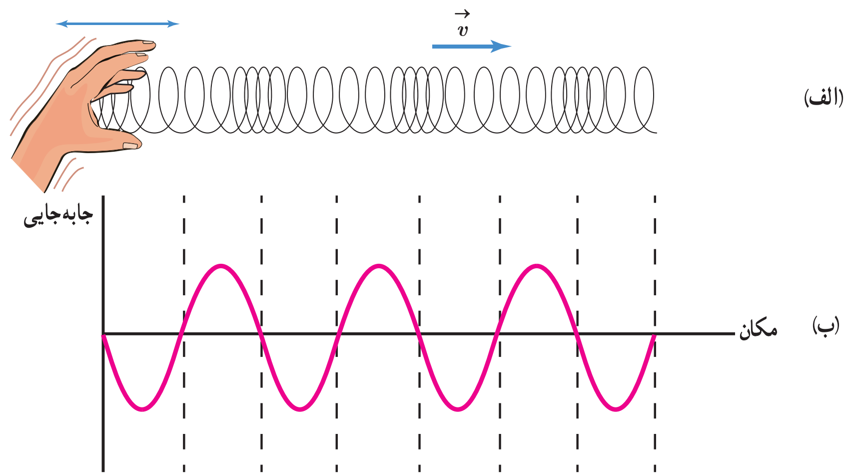
شکل ۳ـ۲۲ طیف امواج الکترومغناطیسی

فعالیت ۳ــ۵

در مورد نواحی اصلی طیف امواج الکترومغناطیسی، چگونگی تولید و کاربردهای آنها تحقیق کنید.

موج طولی و مشخصه‌های آن : در انتشار موج طولی در یک فنر بلندِ کشیده شده دیدیم که با انتشار موج، ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی به‌طور متناوب در طول فنر ظاهر می‌شوند. برای اینکه این موج را مدل‌سازی کنیم لازم است ناحیه‌های جمع‌شدگی و بازشدگی را با دقت بیشتری مورد بررسی قرار دهیم. در یک لحظه از زمان، در مکان‌هایی که بیشترین جمع‌شدگی یا بیشترین بازشدگی حلقه‌ها رخ می‌دهد، جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل برابر صفر است. در وسط فاصلهٔ بین یک جمع‌شدگی بیشینه و یک بازشدگی بیشینهٔ مجاورِ هم، اندازهٔ جابه‌جایی هر جزء فنر از وضعیت تعادل، بیشینه است. به این ترتیب می‌توان برای فنرِ شکل ۳ــ۲۳الف، نمودار جابه‌جایی ــ مکانِ شکل ۳ــ۲۳ ب را رسم کرد. با استفاده از چنین نموداری، برای یک موج طولی نیز می‌توانیم همان مشخصه‌های موج عرضی را تعریف کنیم؛ مثلاً در حالی که طول‌موج برای امواج عرضی برابر با فاصلهٔ دو قله یا دو درهٔ متوالی است، در مورد امواج طولی، طول‌موج برابر با فاصلهٔ بین دو تراکم (برای فنر، جمع‌شدگی) یا دو انبساط (برای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنهٔ موج طولی برابر با بیشینهٔ جابه‌جایی از مکان تعادل است.

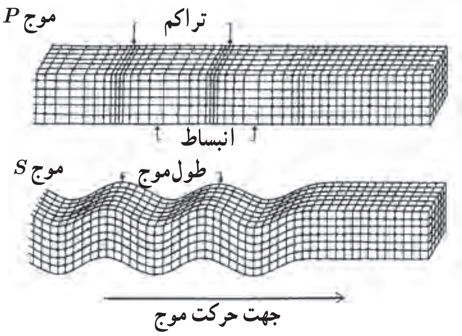
در اینجا نیز همانند موج عرضی، هر جزء فنر در مدت یک دوره (T) یک نوسان کامل انجام می‌دهد و در این مدت موج به اندازهٔ یک طول‌موج (λ) پیشروی می‌کند. بنابراین تندی انتشار موج طولی نیز از همان رابطهٔ موج عرضی با طول‌موج و دورهٔ تناوب ($v=\lambda/T$) به‌دست می‌آید. البته این به این معنا نیست که در یک جسم تندی انتشار هر دو نوع موج برابر است. برای امواج مکانیکی، تندی انتشار امواج طولی در یک محیط جامد بیشتر از تندی انتشار امواج عرضی در همان محیط است.



شکل ۳ــ۲۳ الف) تصویری لحظه‌ای از ایجاد نواحی جمع‌شدگی و بازشدگی در طول یک فنر بلند کشیده، هنگام انتشار موج طولی سینوسی در فنر ب) نمودار جابه‌جایی ــ مکان برای موج ایجاد شده در فنر

مثال ۳ــ۸

امواج لرزه‌ای[۱] موج‌های مکانیکی‌ای هستند که از لایه‌های زمین عبور می‌کنند. یکی از منشأهای مهم امواج لرزه‌ای، زمین‌لرزه‌ها هستند. دو نوع از امواج لرزه‌ای، امواج اولیهٔ P[۲] و امواج ثانویهٔ S[۳] هستند. امواج P، امواجی طولی و امواج S امواجی عرضی هستند. معمولاً تندی موج‌های P در حدود ۸/۰km/s و تندی موج‌های S در حدود ۴/۵ km/s است. یک دستگاه لرزه‌نگار[۴] موج‌های P و S حاصل از یک زمین‌لرزه را ثبت می‌کند. فرض کنید نخستین امواج P، ۳/۰ دقیقه پیش از نخستین امواج S دریافت شوند.



اگر این موج‌ها روی خط راستی حرکت کنند، زمین‌لرزه در چه فاصله‌ای از محل لرزه‌نگار رخ داده است؟

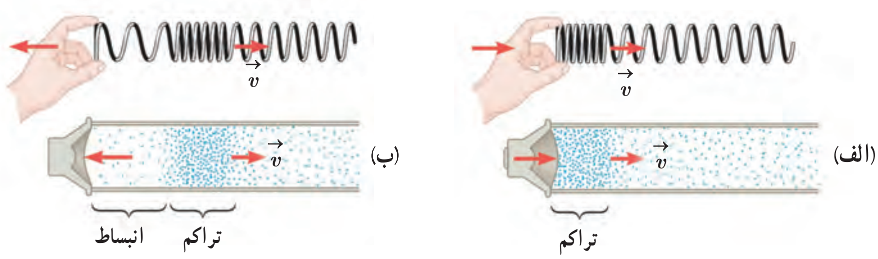
پاسخ : نخست با استفاده از رابطهٔ $\Delta x = v\Delta t$ که در فصل ۱ آموختیم، زمان پیمودن هر یک از دو موج را می‌یابیم. اگر تندی موج S را با v_s و تندی موج P را با v_P نشان دهیم، اختلاف زمان رسیدن این دو موج چنین می‌شود :

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_s} - \frac{\Delta x}{v_P} = \frac{(v_P - v_s)\Delta x}{v_s v_P}$$

و از آنجا Δx را به‌دست می‌آوریم

$$\Delta x = \frac{v_s v_P}{v_P - v_s}\Delta t = \frac{(۴/۵\,\text{km/s})(۸/۰\,\text{km/s})}{(۸/۰\,\text{km/s}) - (۴/۵\,\text{km/s})}(۳/۰ \times ۶۰\,\text{s}) = ۱/۹ \times ۱۰^{۳}\,\text{km}$$

موج صوتی : صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش از قبیل سیم گیتار، تارهای صوتی حنجره انسان، دیاپازون، و یا پوسته‌های مرتعشی مانند صفحهٔ مرتعش (دیافراگم) یک بلندگو، تولید می‌شود، که اصطلاحاً به اینها *چشمهٔ صوت* گفته می‌شود. وقتی یک چشمهٔ صوت مرتعش می‌شود، معمولاً صوت ایجادشده در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. افزون بر این، صوت فقط در محیط‌های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می‌تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی به دلیل طبیعت طولی خود، مثل موج طولی ایجاد شده در یک فنر کشیده، در مقایسه با بازشدگی‌ها و جمع‌شدگی‌های فنر، از مجموعه‌ای از *تراکم‌ها* و *انبساط‌ها* تشکیل شده‌اند؛ مثلاً با ارتعاش دیافراگم یک بلندگو، موجی صوتی ایجاد می‌شود. حرکت رو به بیرون دیافراگم، هوای جلوی آن را متراکم می‌کند. این تراکم که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود مشابه ناحیهٔ جمع‌شدگی در یک فنرِ کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳ــ۲۴ الف). پس از تولید یک ناحیهٔ متراکم، دیافراگم حرکتش



شکل ۳ــ۲۴ الف) با حرکت رو به بیرون دیافراگم، یک تراکم ایجاد می‌شود. ب) با حرکت رو به داخل دیافراگم، یک انبساط ایجاد می‌شود. این تراکم و انبساط شبیه به جمع‌شدگی و بازشدگی در یک فنر بلند است.

۱ــ Seismic Waves
۲ــ Primary Waves
۳ــ Secondary Waves
۴ــ Seismograph

را برعکس می‌کند و به سمت داخل می‌رود. حرکت رو به داخل دیافراگم، هوای جلوی آن را منبسط می‌کند. این انبساط که با تندی صوت از بلندگو دور می‌شود، مشابه ناحیهٔ بازشدگی در یک فنر کشیده است که در آن موجی طولی روانه شده است (شکل ۳ـ۲۴ب). توجه کنید، درحالی‌که موج از بلندگو به شنونده می‌رسد، هر مولکول هوا، با موج حرکت نمی‌کند، بلکه در مکان ثابتی به جلو و عقب نوسان می‌کند (شکل ۳ـ۲۵).



شکل ۳ـ۲۵ در حالی که موج از بلندگو به سمت شنونده حرکت می‌کند، مولکول‌های هوا در جای خود نوسان می‌کنند.

پرسش ۳ـ۶

الف) چگونگی ایجاد صوت توسط دیاپازون را توضیح دهید.

ب) به نظر شما چه سازوکاری موجب صدای وزوزِ حشرات هنگام پرواز می‌شود؟

تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطهٔ $v=f\lambda$ به بسامد و طول‌موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده است که عموماً صوت در جامدها سریع‌تر از مایع‌ها و در مایع‌ها سریع‌تر از گازها حرکت می‌کند، گرچه استثناهایی نیز وجود دارد. جدول ۳ـ۱ تندی صوت را در تعدادی از گازها، مایع‌ها و جامدها نشان می‌دهد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تندی صوت افزون بر جنس محیط به دما نیز بستگی دارد و از این رو معمولاً تندی صوت در مواد، همراه با دمای متناظر آنها نوشته می‌شود.

جدول ۳ـ۱ تندی صوت در محیط‌های مختلف

محیط	تندی (m/s)
گازها*	
هوا (۰°C)	۳۳۱
هوا (۲۰°C)	۳۴۳
هلیم (۰°C)	۹۶۵
هیدروژن (۰°C)	۱۲۸۴
مایع‌ها	
متیل الکل (۲۵°C)	۱۱۴۳
آب (۰°C)	۱۴۰۲
آب (۲۰°C)	۱۴۸۲
آب دریا (۲۰°C و شوری ۳/۵٪)	۱۵۲۲
جامدها	
فولاد	۵۹۴۱
گرانیت	۶۰۰۰
آلومینیم	۶۴۲۰

* فشار همهٔ گازها ۱atm است.

فعالیت ۳ـ۶

اندازه‌گیری تندی صوت: یک روش ساده برای اندازه‌گیری تندی صوت به این ترتیب است: دو میکروفون را مطابق شکل به یک زمان‌سنج حساس[1] متصل کنید. این زمان‌سنج می‌تواند بازه‌های زمانی را با دقت میلی‌ثانیه اندازه‌گیری کند. وقتی چکش را به صفحهٔ فلزی بکوبیم، امواج صوتی که به سمت دو میکروفون روانه می‌شوند، نخست میکروفون نزدیک‌تر و سپس میکروفون دورتر را متأثر می‌سازند. اختلاف فاصلهٔ میکروفون‌ها از محل برخورد چکش با صفحهٔ فلزی را اندازه می‌گیریم. با استفاده از زمان‌سنج می‌توانیم تأخیر زمانی بین دریافت صوت توسط دو میکروفون را ثبت کنیم. اکنون با استفاده از رابطهٔ $v=\Delta x/\Delta t$ می‌توانیم تندی صوت را در هوا بیابیم. درصورتی‌که این اسباب را در مدرسه دارید با استفاده از آن، تندی صوت را در هوا اندازه بگیرید.



۱ـ Fast timer

تمرین ۳ـ۶

شخصی با چکّش به انتهای میلهٔ باریک بلندی ضربه‌ای می‌زند. تندی صوت در این میله ۱۵ برابر تندی صوت در هوا است. شخص دیگری که گوش خود را نزدیک به انتهای دیگر میله گذاشته است، دو صدا را که یکی از میله می‌آید و دیگری از هوای اطراف میله، با اختلاف زمانی ۰/۱۲s می‌شنود. اگر تندی صوت در هوا ۳۴۰m/s باشد، طول میله چقدر است؟

خوب است بدانید

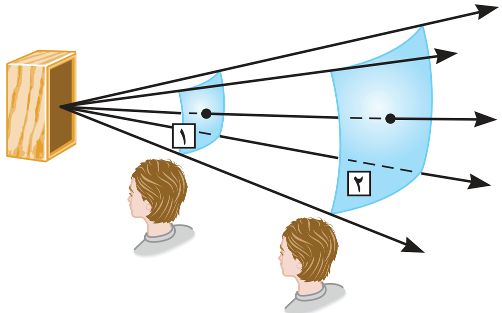
خطای شنوایی در زیر آب

سازوکاری که مغز برای تعیین جهت چشمهٔ صدا به‌کار می‌برد مبتنی بر تأخیر زمانی بین رسیدن صدا به گوش نزدیک‌تر به چشمه و گوشی است که دورتر از چشمه قرار دارد. مثلاً اگر چشمهٔ صدا مستقیماً در طرف راست شما باشد، تأخیر زمانی ۰/۰۰۰۵۸s است و تجربهٔ قبلی به درستی به شما می‌گوید که چشمه در سمت راست شما قرار دارد. ولی اگر شما و چشمهٔ صدا هر دو در آب فرو روید میزان تأخیر زمانی تنها $\frac{1}{4}$ تأخیر زمانی قبلی خواهد بود، زیرا تندی صوت در آب ۴ برابر تندی صوت در هوا است. پس صدا سریع‌تر از گوش نزدیک‌تر به گوش دیگر حرکت می‌کند. این تأخیر زمانی کوتاه‌تر و تجربهٔ قبلی شما این علامت اشتباه را می‌دهد که چشمه در زاویهٔ دیگری از جهت مقابل شما قرار دارد.

شدت و تراز شدت صوت: انتشار صوت از هر چشمهٔ صوتی همراه با انتقال پی‌درپی انرژی از ناحیه‌ای از محیط به ناحیه‌ای دیگر از آن است. در واقع چشمهٔ صوت، این انرژی را با به حرکت درآوردن لایه‌ای از محیط که در تماس مستقیم با چشمه است به محیط می‌دهد. انرژی از این لایه به لایهٔ بعدی و از آنجا به لایه‌های بعدتر منتقل و در تمام جهت‌ها منتشر می‌شود. شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند (شکل ۳ـ۲۶).

(۳ـ۱۱) (شدت صوت) $$I = \frac{P_{av}}{A}$$

که در آن P_{av} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می‌کند. بنابراین یکای شدت صوت، وات بر مترمربع (W/m^2) است.



شکل ۳ـ۲۶ با انتشار صوت از چشمه، انرژی به‌طور عمود، نخست از سطح ۱ و سپس از سطح ۲ که مساحت بیشتری دارد، می‌گذرد.

شدت صوت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت. با اندازه‌گیری شدت صوت‌های مختلف درمی‌یابیم نسبت شدت‌های صوت در گسترهٔ شنوایی انسان می‌تواند در حدود $۱۰^{۱۲}$ باشد (جدول ۳ــ۲). برای بررسی چنین گسترهٔ وسیعی از شدت‌ها راحت‌تر آن است که از لگاریتم (در پایهٔ ۱۰) استفاده کنیم. یعنی به‌جای شدت I یک موج صوتی، ساده‌تر این است که از تراز شدت صوت (تراز صوتی) که به‌صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کنیم:

$$\beta = (۱۰\,\mathrm{dB})\log\left(\frac{I}{I_۰}\right) \qquad \text{(تراز شدت صوت)} \qquad (۳ــ۱۲)$$

که در آن dB مخفف دسی‌بل، یکای تراز شدت صوت است که به افتخار الکساندر گراهام بل (۱۸۴۷ــ۱۹۲۲ م.) انتخاب شده است. همچنین $I_۰$ شدت مرجع ($۱/۰۰ \times ۱۰^{-۱۲}\,\mathrm{W/m^۲}$) به این دلیل انتخاب شده است که نزدیک به حد پایین گسترهٔ شنیداری انسان است. یک موج صوتی با شدت $I=I_۰$ تراز شدت صوتی برابر ۰dB دارد. جدول ۳ــ۲، شدت‌ها و ترازهای شدت صوت را برای چند صدای متفاوت داده است.

جدول ۳ــ۲ شدت و تراز شدت صوت برای چند صدای متفاوت

صوت	شدت صوت $(\mathrm{W/m^۲})$	تراز شدت صوت (dB)
نفس کشیدن در فاصلهٔ ۳m	$۱۰^{-۱۱}$	۱۰
پچ‌پچ در فاصلهٔ ۱m	$۱۰^{-۱۰}$	۲۰
کتابخانه	$۱۰^{-۹}$	۳۰
خیابان بی‌سروصدا	$۱۰^{-۸}$	۴۰
رستوران ساکت	$۱۰^{-۷}$	۵۰
صحبت معمولی در فاصلهٔ ۱m	$۱۰^{-۶}$	۶۰
خیابان پر سروصدا	$۱۰^{-۵}$	۷۰
در نزدیکی جاروبرقی	$۱۰^{-۴}$	۸۰
قطار در عبور از یک تقاطع	$۱۰^{-۳}$	۹۰
کارگاه ماشین‌آلات پر سروصدا	$۱۰^{-۲}$	۱۰۰
دستگاه پخش صوت در بیشترین صدای خود	$۱۰^{-۱}$	۱۱۰
متهٔ سنگ‌شکن	$۱۰^{۰}$	۱۲۰
موتور جت در فاصلهٔ ۳۰m	$۱۰^{۱}$	۱۳۰

مثال ۳ــ۹

تراز شدت صوت یک مخلوط کن ۸۰dB است. شدت این صدا چقدر است؟

پاسخ: با استفاده از رابطهٔ ۳ــ۱۲ داریم:

$$\beta = (۱۰\,\mathrm{dB})\log(I/I_۰)$$

$$۸۰\,\mathrm{dB} = (۱۰\,\mathrm{dB})\log(I/I_۰)$$

$$\log(I/I_۰) = ۸/۰$$

$$(I/I_۰) = ۱۰^{۸/۰} \Rightarrow I = ۱۰^{۸/۰}(۱/۰۰\times۱۰^{-۱۲}\,\mathrm{W/m^۲}) = ۱/۰۰\times۱۰^{-۴}\,\mathrm{W/m^۲}$$

تمرین ۳ــ۷

با زیاد کردن صدای تلویزیونی، شدت صوتی که به گوش ما می‌رسد ۱۰۰ برابر می‌شود. تراز شدت صوتی که می‌شنویم چند دسی‌بل افزایش یافته است؟

ادراک شنوایی: وقتی دیاپازونی را با ضربه‌ای به ارتعاش وامی‌داریم، دیاپازون نوسان‌هایی انجام می‌دهد که به دلیل میرایی کم، به حرکت هماهنگ ساده نزدیک است. به صوت حاصل از چنین چشمه‌هایی

تُنِ موسیقی یا به‌اختصار *تُن*[۱] گفته می‌شود. با شنیدن هر تُن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع[۲] و بلندی[۳] آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیاپازون با بسامدهای مختلف به‌طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد. اما بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیاپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد. بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آشکارساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به‌طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گسترهٔ ۲۰۰۰Hz تا ۵۰۰۰Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تُن‌های صدای ۲۰Hz تا ۲۰,۰۰۰Hz است.

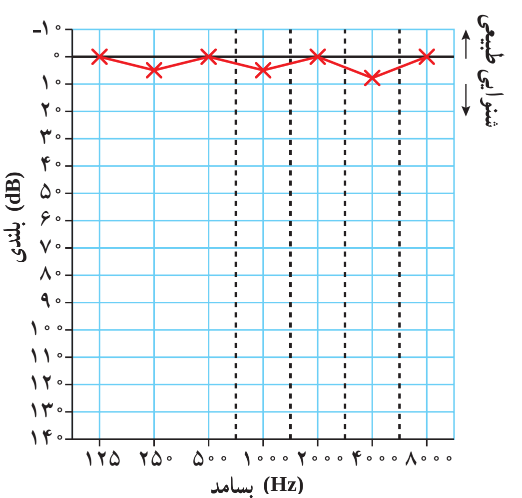
خوب است بدانید

شنوایی‌سنجی و اودیوگرام

همان‌طور که گفتیم گوش به تمام بسامدها به‌طور یکسانی حساس نیست و بنابراین برای آزمودن شنوایی یک شخص، گستره‌ای از بسامدهای مختلف استفاده می‌شود. در حین یک آزمون شنوایی‌سنجی صداهایی با بسامدهای ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ هرتز در گوش ایجاد می‌شود (شکل الف). هر بسامد با شدت پایینی شروع می‌شود، به‌طوری که شخص ابتدا نمی‌تواند آن را بشنود. سپس شدت به‌تدریج زیاد می‌شود تا اینکه بالاخره شخص بتواند صدا را بشنود. بلندی مربوط به این صدا که اصطلاحاً *آستانهٔ شنوایی* در بسامد آزمون گفته می‌شود، ثبت می‌گردد. سپس نتایج روی نمودار بلندی (برحسب dB) در برابر بسامد رسم می‌شود. به نمودار حاصل *اودیوگرام* می‌گویند (شکل ب). اگر نتایج حاصل در محدودهٔ مشخصی قرار گیرد که به عنوان شنوایی طبیعی تعیین شده است، شنوایی شخص طبیعی محسوب می‌شود. البته افزون بر آستانهٔ شنوایی، *آستانهٔ دردناکی* نیز برای هر بسامد تعریف می‌شود که بیشینهٔ بلندی صدایی است که در آن بسامد بدون آزار شنوایی، قابل شنیدن است. آستانهٔ دردناکی برخلاف آستانهٔ شنوایی چندان به بسامد آزمایش حساس نیست.



الف) شخصی در حین آزمون شنوایی‌سنجی

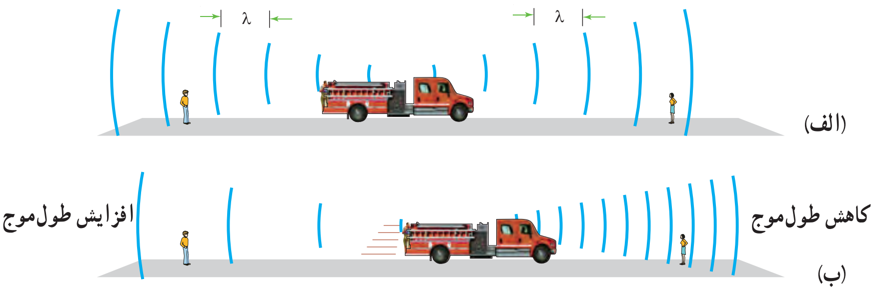


ب) یک نمودار اودیوگرام نوعی برای شخصی با شنوایی خوب

۱ــ Tone ۲ــ Pitch ۳ــ Loudness

اثر دوپلر : فرض کنید یک ماشین آتش‌نشانی در حالی که آژیر آن روشن است در کنار خودروی شما متوقف باشد. شما همان بسامدی را از آژیر می‌شنوید که رانندهٔ ماشین آتش‌نشانی می‌شنود. ولی اگر خودروی شما به ماشین آتش‌نشانی نزدیک و یا از آن دور شود، بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. همچنین اگر خودروی شما ساکن باشد و ماشین آتش‌نشانی به شما نزدیک و سپس از شما دور شود باز هم بسامدهای متفاوتی را خواهید شنید. اینها مثال‌هایی از اثر دوپلر است که به افتخار کاشف آن یوهان کریستین دوپلر (۱۸۵۳ــ۱۸۰۳ م.) فیزیک‌دان اتریشی، نام‌گذاری شده است. اثر دوپلر نه‌تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است. ما در اینجا نخست امواج صوتی را در نظر می‌گیریم و به‌عنوان دو حالت خاص، وضعیت‌هایی را بررسی می‌کنیم که در آنها چشمهٔ صوتی به شنوندهٔ ساکن نزدیک و یا از او دور شود، و یا شنونده به چشمهٔ صوتی ساکن نزدیک و یا از او دور شود[1].

الف) چشمهٔ متحرک و ناظر (شنوندهٔ) ساکن : شکل ۳ــ۲۷ الف، جبهه‌های موج حاصل از صدای آژیر یک ماشین آتش‌نشانی ساکن را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود فاصلهٔ این جبهه‌ها از هم، در جلو و عقب ماشین یکسان است، ولی اگر ماشین آتش‌نشانی مثلاً به جلو حرکت کند، فاصلهٔ جبهه‌های موج در جلوی ماشین کمتر از پشت آن خواهد بود (شکل ۳ــ۲۷ ب). بنابراین اگر ناظر ساکنی را روبه‌روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول‌موج کوتاه‌تری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماشین طول‌موج بلندتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.



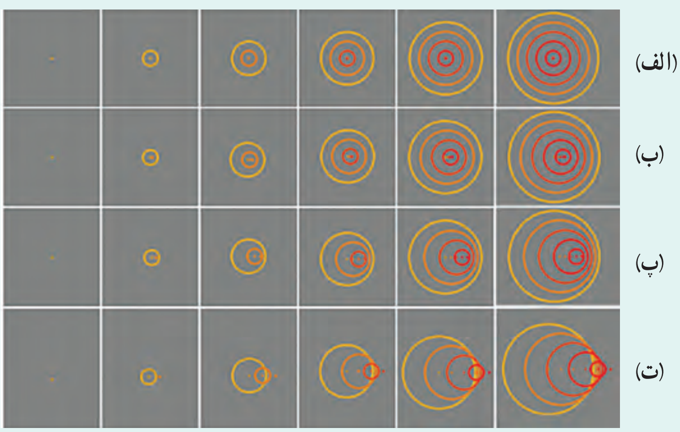
شکل ۳ــ۲۷ الف) وقتی ماشین ساکن است تجمع جبهه‌های موج در جلو و عقب ماشین یکسان است. ب) با حرکت رو به جلوی ماشین، تجمع جبهه‌های موج در جلوی ماشین بیشتر و در عقب آن کمتر می‌شود.

پرسش ۳ــ۷

در هر ردیف شکل روبه‌رو، جبهه‌های موج متوالی حاصل از یک چشمه را می‌بینید.

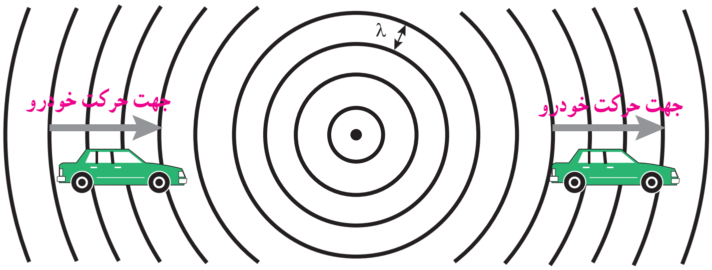
الف) تندی چشمه‌ها را با هم مقایسه کنید.

ب) تندی هر چشمه را با تندی صوت مقایسه کنید.



۱ــ روابط و محاسبات مربوط به اثر دوپلر خارج از برنامهٔ درسی است و نباید در ارزشیابی لحاظ شود.

ب) چشمهٔ ساکن و ناظر (شنوندهٔ) **متحرک :** در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در حالی‌که اگر ناظر از چشمه دور شود، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج کمتری مواجه می‌شود که این منجر به کاهش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود (شکل ۳ــ۲۸).



شکل ۳ــ۲۸ در مدت زمان یکسان خودرویی که به چشمهٔ ساکن صوت نزدیک می‌شود با جبهه‌های موج بیشتری برخورد می‌کند، در حالی که خودرویی که از این چشمه دور می‌شود با جبهه‌های موج کمتری برخورد می‌کند.

۳ــ۷ بازتاب موج

تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، دیدن صفحهٔ این کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند. برخی از جانداران نظیر خفاش از همین ویژگی برای یافتن مسیر خود یا طعمه استفاده می‌کنند (شکل ۳ــ۲۹). امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند. در واقع همان‌طور که در علوم هشتم آموختیم، وقتی نور بازتابیده از جسمی به چشم ما برسد، آن جسم را می‌بینیم. در این بخش، نخست بازتاب امواج مکانیکی و سپس بازتاب امواج الکترومغناطیسی را بررسی می‌کنیم.



شکل ۳ــ۲۹ خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند.

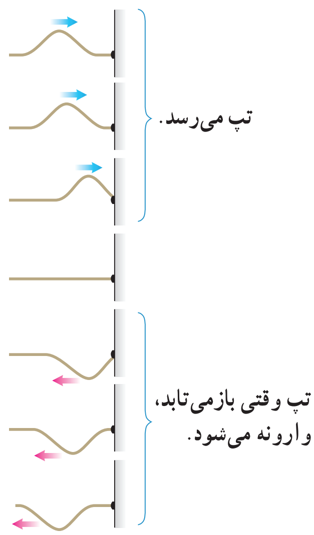
بازتاب امواج مکانیکی : اگر تپی را در یک فنر (یا یک ریسمان) کشیدهٔ بلند که یک سر آن بر تکیه‌گاهی ثابت شده است روانه کنیم، وقتی تپ به تکیه‌گاه (مرز) می‌رسد نیرویی به آن وارد می‌کند و طبق قانون سوم نیوتون، تکیه‌گاه نیز نیرویی با اندازهٔ برابر و در جهت مخالف بر فنر وارد می‌آورد. این نیرو در محل تکیه‌گاه، تپی در فنر ایجاد می‌کند که روی فنر در جهت مخالف تپِ تابیده حرکت می‌کند (شکل ۳ــ۳۰). شکل ۳ــ۳۱ طرحی واضح‌تر از تابش و بازتابش چنین تپی را نشان می‌دهد. چنین بازتابی را بازتاب در یک بُعد می‌گویند.

به خاطر داریم وقتی تیغهٔ تختی را بر سطح آب تشت موج به نوسان درمی‌آوردیم، امواج تختی بر سطح آب تشکیل می‌شد. اکنون اگر بر سر راه این امواج مانع‌هایی قرار دهیم، این امواج پس از برخورد با این موانع بازمی‌تابند. به‌چنین بازتابی، بازتاب در دو بُعد می‌گویند. ساده‌ترین شکل یک مانع، مانعی تخت است. در حضور این نوع مانع، امواج بازتابیده نیز تخت‌اند (شکل ۳ــ۳۲)[1]. شکل ۳ــ۳۳ طرحی از چنین بازتابی را نشان می‌دهد. با استفاده از جبهه‌های موج می‌توانیم به‌طور تجربی به رفتار موج در برخورد با یک مانع پی‌ببریم. طرح معادل دیگری برای نشان دادن رفتار موج، استفاده از نمودار پرتویی است. یک پرتو، پیکان مستقیمی عمود بر جبهه‌های موج است که جهت انتشار موج را نشان می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان نمودار پرتویی مربوط به شکل ۳ــ۳۳ را در حضور جبهه‌های موج به‌صورت شکل ۳ــ۳۴ رسم کرد. زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند[2] و زاویهٔ بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویهٔ بازتابش می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[3]. آزمایش‌هایی نظیر آنچه در شکل ۳ــ۳۳ نشان داده شده است، ثابت می‌کند که برای هر وضعیت مانع، و همهٔ انواع دیگر موج، مانند امواج دایره‌ای یا کروی نیز، همواره زاویهٔ بازتابش برابر با زاویهٔ تابش است یعنی : $\theta_i = \theta_r$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

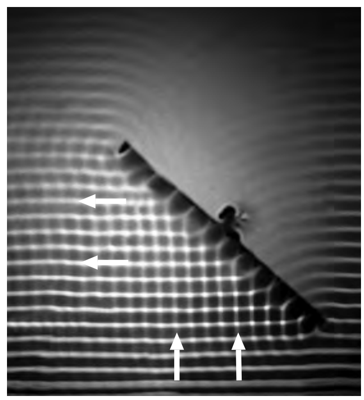
نمونهٔ دیگری از بازتاب امواج مکانیکی، بازتاب امواج صوتی است. صوت می‌تواند از یک سطح سخت مانند دیوار بازتابش کند. این مثالی از بازتاب امواج در سه بُعد است. بازتاب صوت نیز از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند. در فعالیت ۳ــ۷ به‌تحقیق این امر می‌پردازیم.



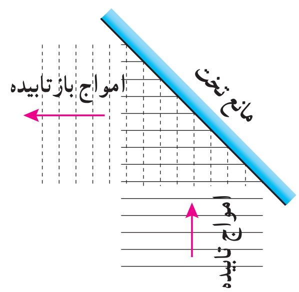
شکل ۳ــ۳۰ چند تصویر لحظه‌ای متوالی از پیشروی و بازتاب یک تپ عرضی در یک فنر بلند کشیده شده که یک سر آن در تکیه‌گاهی واقع در سمت راست، ثابت شده است.



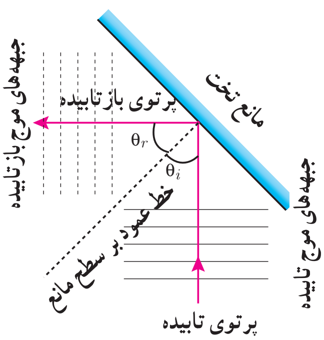
شکل ۳ــ۳۱ طرحی از پیشروی و بازتاب تپ عرضیِ شکل ۳ــ۳۰



شکل ۳ــ۳۲ بازتاب امواج تخت از مانع تخت در تشت موج.



شکل ۳ــ۳۳ طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌چین)



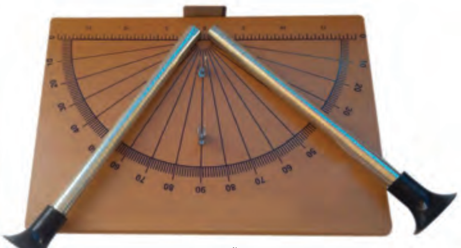
شکل ۳ــ۳۴ نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت

۱ــ توجه کنید که طول مانع باید در مقایسه با طول موج λ بسیار بزرگ باشد.

۲ــ i سرواژهٔ کلمهٔ incident به معنی تابش است. ۳ــ r سرواژهٔ کلمهٔ reflection به معنی بازتابش است.

فعالیت ۳ـ۷

با اسباب نشان داده شده در شکل روبه‌رو، می‌توان زاویهٔ تابش و زاویهٔ بازتابش را در امواج صوتی اندازه‌گیری کرد. با استفاده از این اسباب، قانون بازتاب عمومی را برای امواج صوتی تحقیق کنید.

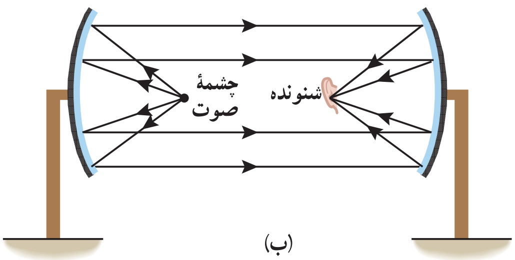


نمایشی از اسباب آزمایش بازتاب صوت

امواج صوتی می‌توانند مانند سایر امواج از سطوح خمیده نیز بازتابیده شوند. شاید در پارک‌های تفریحی دو سطح کاو را در برابر هم دیده باشید که وقتی شخصی در کانون یکی از این سطوح صحبت می‌کند، شخص دیگری در کانون سطح کاو دیگر آن را می‌شنود (شکل ۳ـ ۳۵).



(الف)



(ب)

شکل ۳ـ۳۵ الف) دو سطح بازتابندهٔ کاو در یک پارک تفریحی و ب) طرحی از بازتاب امواج صوتی از دو سطح کاو مقابل هم با استفاده از نمودار پرتویی

فعالیت ۳ـ۸

دربارهٔ میکروفون سهموی که از آن برای ثبت صداهای ضعیف و دستگاه *لیتوتریپسی*[1] که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود تحقیق کنید.



تصویری از یک میکروفون سهموی

پژواک[2] : در برابر دیواره یا صخرهٔ بلندی که چند ده متر از شما فاصله دارد، بایستید و یک بار دست بزنید. پس از مدت زمان کوتاهی، بازتاب صدای دست زدن خود را خواهید شنید. اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی پژواک می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از ۰/۱s باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

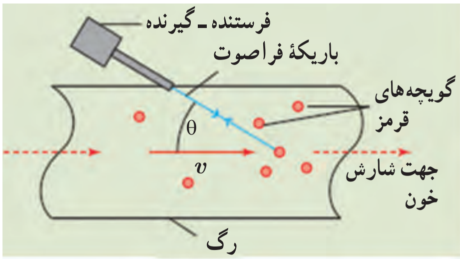
۱ـ Lithotripsy　　۲ـ Echo

فنّاوری و کاربرد: مکان‌یابی پژواکی

مکان‌یابی پژواکی[۱] روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به‌کار می‌رود. برخی از جانوران نظیر خفاش و دُلفین از این روش استفاده می‌کنند. خفاش، فَوَرانی از امواج فراصوتی را گسیل می‌کند که این بسته به نوع خفاش از دهان یا سوراخ‌های بینی آن گسیل می‌شود. این امواج از اشیایی که در مسیر خفاش قرار دارند بازمی‌تابد و بدین ترتیب خفاش را از اشیایی که بر سر راه او قرار دارند آگاه می‌سازد. البته بسته به اینکه شیء بازتابنده، خودِ خفاش، یا هر دو متحرک باشند، خفاش تغییر بسامدی ناشی از اثر دوپلر را در موج بازتابیده ادراک می‌کند و بدین‌وسیله می‌تواند سرعت خود یا شیء متحرک را تعیین کند. خفاش‌ها از این ویژگی برای شناسایی و شکار طعمه‌های خود استفاده می‌کنند. همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به‌کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی پژواکی استفاده می‌شود.

فعالیت ۳ـ۹

اندازه‌گیری تندی شارش خون : از مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر می‌توان برای تعیین تندی شارش خون (گویچه‌های قرمز) در رگ‌ها استفاده کرد. در مورد چگونگی این فنّاوری تحقیق کنید.



تمرین ۳ـ۸

کمترین فاصلهٔ بین شما و یک دیوار بلند چقدر باشد تا پژواک صدای خود را از صدای اصلی تمیز دهید؟ تندی صوت در هوا را ۳۴۰m/s در نظر بگیرید.

مثال ۳ـ۱۰

والِ عنبر یکی از جانورانی است که با استفاده از پژواک امواج فراصوتی، مکان‌یابی می‌کند. بسامد امواج فراصوتی‌ای که این وال تولید می‌کند حدود ۱۰۰kHz است. با توجه به اینکه تندی صوت در آب دریا طبق جدول ۳ـ۱ حدود $۱/۵۲\times ۱۰^۳$ m/s است، الف) طول‌موج این صوت و ب) زمان رفت و برگشت صوت گسیل شده توسط وال برای مانعی که در فاصلهٔ ۱۰۰m از آن قرار گرفته، چقدر است؟

پاسخ : الف) با استفاده از رابطهٔ $\lambda = v/f$ داریم :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{۱/۵۲\times ۱۰^{۳}\,\mathrm{m/s}}{۱۰۰\times ۱۰^{۳}\,\mathrm{s^{-1}}} = ۱/۵۲\times ۱۰^{-۲}\,\mathrm{m} = ۱/۵۲\mathrm{cm}$$

برای تشخیص یک جسم، اندازهٔ آن باید در حدود طول‌موج به‌کار رفته یا بزرگ‌تر از آن باشد. بنابراین، وال اجسامی در حدود این طول‌موج یا بزرگ‌تر را می‌تواند تشخیص دهد.

ب) زمان لازم برای حرکت رفت و برگشت صوت بین وال و مانع برابر است با :

$$t = \frac{۲L}{v} = \frac{۲\times ۱۰۰\mathrm{m}}{۱/۵۲\times ۱۰^{۳}\,\mathrm{m/s}} = ۰/۱۳۲\mathrm{s}$$

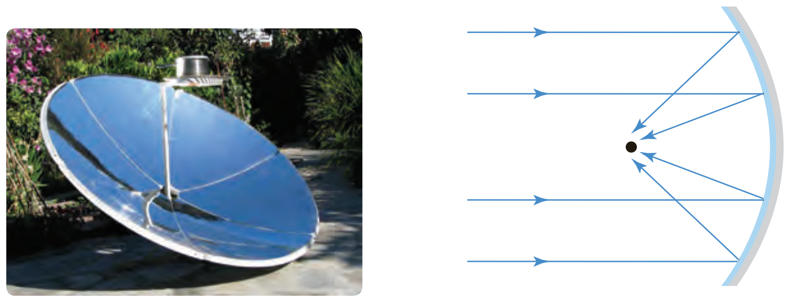
۱ـ Echolocation



کریستین هویگنس (۱۶۹۵ــ۱۶۲۹م.)
در لاهۀ هلند به دنیا آمد. در دانشگاه‌های لیدن و بِردا تحصیل کرد و هنگامی که فقط ۲۲ سال داشت مقاله‌هایی در زمینۀ ریاضی و اخترشناسی نوشت که مورد توجه رنه دکارت، ریاضی‌دان نامی، قرار گرفت. هویگنس در زمان خود دانشمندی با ذوق و مبتکر بود. در سال ۱۶۵۷ ساعت آونگی را اختراع کرد که پیش از آن دانشمندانی مانند گالیله روی آن کار کرده بودند، اما به جایی نرسیده بودند. علاوه بر این، او پژوهش‌هایی با ارزش روی نور نیز انجام داد و نظریۀ مشهور خود را در این مورد ارائه کرد. بنا به نظریۀ هویگنس، نور از موج‌های زیادی تشکیل شده است که این موج‌ها را می‌توان به موج‌های صوتی یا موج‌های روی آب تشبیه کرد. نظریۀ موجی بودن نور هویگنس بحث‌های فراوانی برانگیخت تا اینکه در حدود ۲۰۰ سال بعد ماکسول فیزیک‌دان اسکاتلندی دوباره به این نظریه پرداخت و به آن جان تازه‌ای بخشید. هویگنس اخترشناس برجسته‌ای نیز بود و اسباب‌ها و دستگاه‌های نوری زیادی را اختراع کرد. اختراع ریزسنج را نیز به او نسبت داده‌اند.

بازتاب امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توانند از یک سطح، بازتابیده شوند و بازتاب آنها از همان قانون بازتاب عمومی پیروی می‌کند.

امواج الکترومغناطیسی تخت تابیده به یک سطح کاو پس از بازتابش، مانند شکل ۳ــ۳۶ الف در یک نقطه کانونی می‌شوند. این نمونۀ دیگری از بازتاب در سه بُعد است. از همین سازوکار برای دریافت امواج رادیویی توسط آنتن‌های بشقابی و یا امواج فروسرخ برای گرم کردن آب یا مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی (شکل ۳ــ۳۶ ب) استفاده می‌شود.

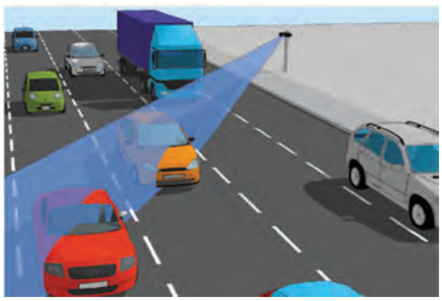


(الف) (ب)

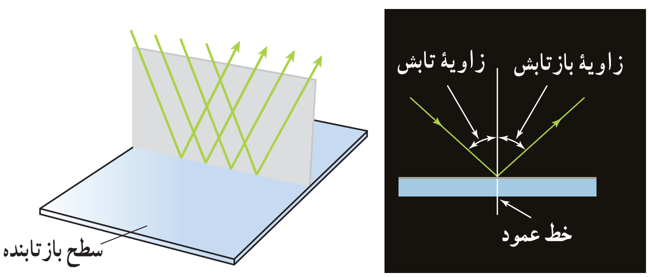
شکل ۳ــ۳۶ الف) یک موج الکترومغناطیسی تخت پس از بازتاب از یک سطح کاو در نقطه‌ای مقابل سطح، کانونی می‌شود. **ب)** تصویری از یک اجاق خورشیدی

فعالیت ۳ــ۱۰

رادار دوپلری : از امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای مکان‌یابی پژواکی استفاده کرد. در این مورد و کاربرد آن به‌خصوص در تعیین تندی خودروها تحقیق کنید. (*راهنمایی :* اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی نیز برقرار است.)



همان‌طور که قبلاً دیدیم نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است. بنابراین نور مرئی نیز از همان قانون بازتاب عمومی امواج پیروی می‌کند؛ یعنی زاویۀ تابش و بازتابش در هر بازتابشی با هم برابرند (شکل ۳ــ۳۷ الف)، افزون بر این، برای نور مرئی نیز همچون سایر امواج، پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده، در هر بازتابشی در یک صفحه واقع‌اند (شکل ۳ــ۳۷ ب).

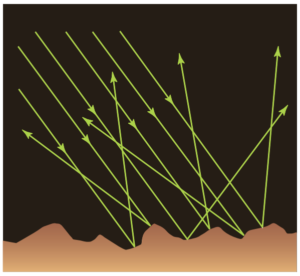


(الف) (ب)

شکل ۳ــ۳۷ الف) در هر بازتابشی زاویۀ تابش و زاویۀ بازتابش با هم برابرند. **ب)** پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

در مواردی که سطح بازتابندهٔ نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه‌ای[1] یا منظم می‌گویند.

نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده[2] یا نامنظم است. این بازتاب وقتی رخ می‌دهد که نور به سطحی برخورد کند که صیقلی و هموار نباشد. پرتوهای نور به‌طور کاتوره‌ای از پستی و بلندی‌های سطح بازتابیده، و در تمام جهات پراکنده می‌شوند (شکل ۳ــ۳۸). به‌دلیل این بازتاب است که شما این صفحهٔ کاغذ، دیوار، دستتان، دوست خود، و... را می‌بینید. در بازتاب آینه‌ای از یک آینهٔ تخت، بازتابش یک دسته پرتوی موازی را فقط در یک جهت می‌توانید ببینید، ولی در بازتاب پخشنده، بازتابش این دسته پرتو را می‌توانید در جهت‌های مختلف مشاهده کنید. توجه کنید منظور از سطح ناهموار آن است که سطح در مقایسه با طول‌موج نور ناهموار است؛ مثلاً یک کاغذ در ظاهر بسیار هموار به نظر می‌رسد اما از دید میکروسکوپی این سطح از اجزای متمایز و کوچکی تشکیل شده است که بسیار بزرگ‌تر از ۱μm هستند. با توجه به اینکه طول‌موج نور مرئی در حدود ۰/۵ μm است، چنین سطحی برای نور مرئی، ناهموار محسوب می‌شود. در مقابل، ناهمواری‌های یک آینه یا یک سطح فلزی صیقلی، بسیار کوچک‌تر از ۱μm است و بنابراین برای نور مرئی سطوحی هموار محسوب می‌شوند.



شکل ۳ــ۳۸ طرحی از بازتاب پخشندهٔ نور از سطحی ناهموار. توجه کنید که در اینجا نیز در هر بازتاب، زاویه‌های تابش و بازتابش با هم برابرند و پرتوی تابش، پرتوی بازتابش، و خط عمود بر سطح بازتابنده در یک صفحه واقع‌اند.

۳ــ۸ شکست موج

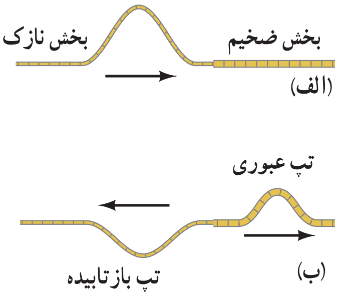
بازتاب، تنها راه برهم‌کنش امواج با محیط نیست. شکست نیز نوع دیگری از برهم‌کنش امواج با محیط است که بر اثر آن جهت پیشروی موج در ورود به محیط جدید تغییر می‌کند. وقتی یک ماهی را از بالای برکه‌ای می‌بینید، آن را در مکان واقعی خود مشاهده نمی‌کنید بلکه مکانی ظاهری بر اثر شکست نور را ادراک می‌کنید (شکل ۳ــ۳۹). رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و... مثال‌های رایجی از شکسته‌شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به



شکل ۳ــ۳۹ شکارچیان بومی آمریکای جنوبی به تجربه دریافته‌اند که محل واقعی یک ماهی متفاوت با محلی است که آن را می‌بینند.

۱ــ specular reflection

۲ــ diffuse reflection

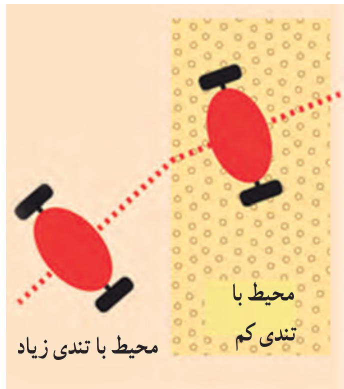


شکل ۳ــ۴۰ الف) تپ فرودی از سمت چپ طناب وارد بخش ضخیم‌تر آن می‌شود. ب) بخشی از آن از مرز عبور می‌کند و بخشی بازمی‌تابد.

اندازهٔ موج‌های نوری اهمیت ندارد. وقتی موج به مرز جدایی دو محیط می‌رسد بخشی از آن بازتابیده می‌شود و بخشی دیگر عبور می‌کند که این افزون بر جذب موج است که در هر دو محیط رخ می‌دهد؛ مثلاً عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است. وقتی این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد (شکل ۳ــ۴۰ الف)، بخشی از این تپ بازمی‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ۳ــ۴۰ ب). برای یک موج سینوسی بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمهٔ موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطهٔ $\lambda = v/f$، طول‌موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.

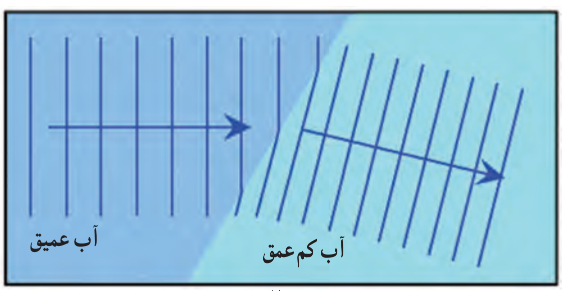
پرسش ۳ــ۸

اگر موج سینوسی از قسمت ضخیم طناب به قسمت نازک آن وارد شود، بسامد، تندی، و طول‌موجِ موجِ عبوری در مقایسه با موج فرودی چه تغییری می‌کند؟



شکل ۳ــ۴۲ وقتی اسباب‌بازی وارد قالیچه می‌شود مسیرش تغییر می‌کند؛ زیرا چرخی که نخست به قالیچه می‌رسد، زودتر کند می‌شود.

در حالت‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج **شکست** پیدا کند. همان‌طور که پیش از این دیدیم، تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. از این ویژگی می‌توانیم برای تحقیق پدیدهٔ شکست در تشت موج استفاده کنیم؛ یعنی با تغییردادن عمق آب در بخشی از تشت می‌توان تندی موج سطحی در آن بخش را تغییر داد که این همان‌طور که دیدیم به تغییر جهت انتشار موج در آن بخش، و به عبارتی به شکست موج می‌انجامد. مشاهده می‌شود با ورود موج به بخش کم‌عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش از جبههٔ موج که زودتر به ناحیهٔ کم‌عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیهٔ جبههٔ موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصلهٔ بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول‌موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج مطابق شکل ۳ــ۴۱ در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند. این مطلب را می‌توان در نزدیک شدن امواج به یک ساحل شیب‌دار نیز مشاهده کرد که با رسیدن جبهه‌های موج به ساحل که در آنجا عمق آب کم می‌شود، جهت انتشار جبهه‌های موج تغییر می‌کند. شاید برای تفهیم این موضوع، مثال یک اسباب‌بازی چرخ‌دار که با عبور از کف صاف اتاق وارد قالیچه‌ای می‌شود، مناسب باشد. با ورود این اسباب‌بازی به قالیچه، تندی آن کم می‌شود و در نتیجه مسیر آن تغییر می‌کند (شکل ۳ــ۴۲).



(الف)



(ب)

شکل ۳ــ۴۱ الف) طرحی از شکست امواج سطحی در مرز آب عمیق و آب کم‌عمق در تشت موج و ب) تصویری واقعی از شکست امواج سطحی در تشت موج

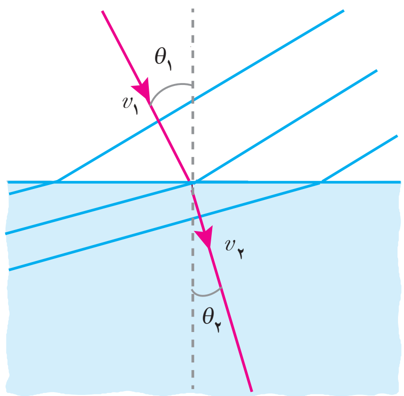
تمرین ۳ــ۹



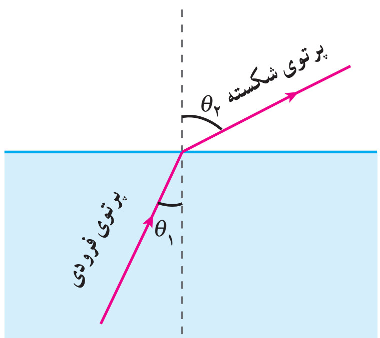
در یک تشت موج به کمک یک نوسان‌ساز تیغه‌ای که با بسامد $5/0\,Hz$ کار می‌کند، امواجی تخت ایجاد می‌کنیم، به‌طوری که فاصلهٔ بین دو برآمدگی متوالی آن برابر با $10\,cm$ می‌شود. اگر اکنون بُره‌ای شیشه‌ای را در کف تشت قرار دهیم، امواج در ورود به ناحیهٔ کم‌عمقِ بالای بُره، شکست پیدا می‌کنند. اگر تندی امواج در ناحیهٔ کم‌عمق، $0/40$ برابر تندی در ناحیهٔ عمیق باشد، طول‌موج امواج در ناحیهٔ کم‌عمق چقدر می‌شود؟

قانون شکست عمومی : در پدیده‌های شکستی که بررسی کردیم، قانونی حاکم است که اکنون به آن می‌پردازیم. فرض کنید مطابق شکل ۳ــ۴۳ جبهه‌های موج تختی به‌طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند. از آنجا که جبهه‌های موج در مرز جدایی دو محیط می‌شکنند، پرتوهای موج که همواره عمود بر جبهه‌های موج هستند در عبور از این مرز تغییر جهت می‌دهند. این پرتوها نیز در شکل ۳ــ۴۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که دیدیم در یک نمودار پرتویی، زاویهٔ پرتوی فرودی با خط عمود بر مرز را زاویهٔ تابش می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند، در حالی که زاویهٔ پرتوی شکسته با خط عمود بر مرز را زاویهٔ شکست می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند[1]. در شکل ۳ــ۴۳، θ_i و θ_r با θ_1 و θ_2 نشان داده شده است. اگر تندی انتشار موج فرودی را v_1 و تندی انتشار موج شکست یافته را v_2 بنامیم، بین تندی‌های v_1 و v_2 و زاویه‌های θ_1 و θ_2 رابطهٔ زیر برقرار است که به آن قانون شکست عمومی می‌گویند.

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}=\frac{v_2}{v_1} \qquad \text{(قانون شکست عمومی)} \qquad (۳ــ۱۳)$$



شکل ۳ــ۴۳ جبههٔ موجی با زاویهٔ تابش θ_1 از محیط اول وارد محیط دوم می‌شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا می‌کند (شکل با فرض $v_2<v_1$ رسم شده است).



شکل ۳ــ۴۴ در صورتی که موج از محیطی با تندی کمتر به محیطی با تندی بیشتر برود، زاویهٔ شکست θ_2 بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش θ_1 می‌شود.

در شکل ۳ــ۴۳ موجی تخت از محیطی با تندی بیشتر به محیطی با تندی کمتر رفته است. ولی اگر موج در جهت مخالف حرکت کند، یعنی از محیط دوم که در آن تندی موج کمتر است وارد محیط اول شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویهٔ شکست بزرگ‌تر از زاویهٔ تابش می‌شود (شکل ۳ــ۴۴).



ابن هیثم در سال ۳۴۳هجری شمسی (۳۵۴ هجری قمری) در بصره متولد شد و در سال ۴۱۸ هجری شمسی (۴۳۰هجری قمری) درگذشت. او با اینکه از آثار گذشتگان خود استفاده کرد، اما بنیان نورشناخت را دگرگون ساخت و آن را به‌صورت علم منظم و مشخصی درآورد. او مانند اقلیدس هم فیزیک‌دان نظری و هم تجربی بود و به منظور تشخیص حرکت مستقیم‌الخط نور، یافتن خصوصیات سایه، موارد استفاده از عدسی‌ها و ویژگی‌های اتاق تاریک آزمایش‌هایی انجام داد. وی برای نخستین بار در مورد بسیاری از مسائل در نورشناسی به تحلیل ریاضی پرداخت. در مبحث شکست نور، وی ثابت کرد که زاویهٔ شکست متناسب با زاویهٔ تابش نیست و به تحقیق در مورد شکست نور در عدسی‌ها و در جو پرداخت. همچنین سهم عمدهٔ او در بحث بازتاب نور که پیش از آن یونانیان به اکتشاف‌های مهمی در آن دست یافته بودند، پژوهش در آینه‌های سهموی و کروی بود. او از آزمایش‌های خود دریافت که در آینهٔ سهموی همهٔ پرتوها در یک نقطه متمرکز می‌شود و از این رو بهترین آینه‌های سوزاننده همین آینه‌های سهموی هستند. **المناظر**، کتابی است که از این دانش‌پژوه مسلمان برجای مانده است، اثری بی نظیر که یافته‌های او را در زمینهٔ نورشناسی دربردارد. نویسنده در این شاهکار خود، با تکیه بر نظریه‌های ریاضی به توضیح علمی فرایند دیدن می‌پردازد و سعی می‌کند ساز و کار دیدن با دو چشم را توضیح دهد.

۱ــ شاخص پایین r سرواژهٔ کلمه انگلیسی refraction به معنی شکست است.

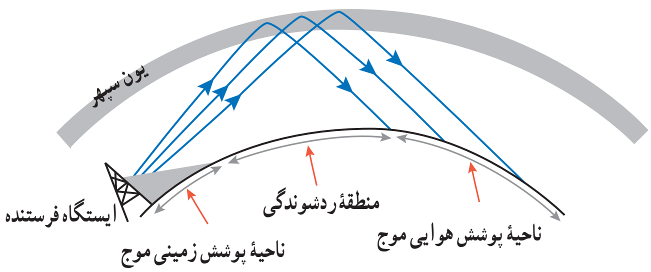
تمرین ۳ـ۱۰

در تمرین ۳ـ۹ با فرض اینکه زاویهٔ تابش امواج برابر 30° باشد، زاویهٔ شکست چقدر می‌شود؟

شکست امواج الکترومغناطیسی : امواج الکترومغناطیسی (و از جمله نور مرئی) نیز با گذر از یک محیط به محیطی دیگر که در آن تندی آنها متفاوت می‌شود، شکست پیدا می‌کنند. به جز گسترهٔ نور مرئی که بیشترین و معروف‌ترین موارد شکست برای آنها مطرح می‌شود و به پیامدها و کاربردهای جالبی می‌انجامد، شکست امواج رادیویی نیز اهمیتی کاربردی در ارتباطات رادیویی دارد.

خوب است بدانید

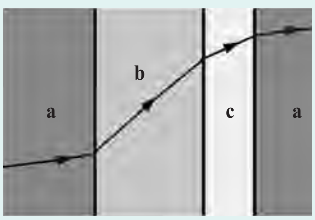
موج‌های ارسال شده از یک ایستگاه فرستندهٔ رادیویی دوردست را به همان وضوحی می‌شنویم که در محدودهٔ آن ایستگاه شنیده می‌شود. روش کار به این ترتیب است که یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا ۳۰ مگاهرتز، به لایهٔ یون‌سپهر (یونسفر) بالای جو که در ارتفاع ۸۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می‌شود. این لایه به علت وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می‌کند که ویژگی‌های فیزیکی‌اش آن را از بقیهٔ جو متمایز می‌سازد. یون‌سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فروسرخ را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول موج‌های بلند (با λی بزرگ‌تر از حدود $10\,\text{m}$) را که در جهت‌های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی‌گرداند. دلیل این اتفاق، یکنواخت نبودن چگالی الکترون‌های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت‌های مختلف آن است، به‌طوری که در سازوکاری مانند پدیدهٔ سراب که بعداً خواهیم آموخت، امواج را به سمت پایین بازمی‌گرداند.



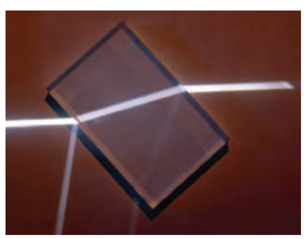
در این شکل *ناحیهٔ پوشش زمینی* مربوط به پیرامون ایستگاه است، که امواج به‌طور مستقیم به گیرنده می‌رسد. *منطقهٔ ردشوندگی* ناحیه‌ای است که امواج به زمین نمی‌رسد، و *ناحیهٔ پوشش هوایی* ناحیه‌ای است که امواج رادیویی با بازگشت از یون سپهر به زمین می‌رسد.

پرسش ۳ـ۹

شکل روبه‌رو یک پرتوی موج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که با عبور از محیط اولیهٔ a، از طریق محیط‌های b و c به محیط a بازمی‌گردد. این محیط‌ها را بر حسب تندی موج در آنها از بیشترین تا کمترین مرتب کنید.



وقتی یک پرتوی نور از محیطی شفاف وارد محیط شفاف دیگری شود، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی دیگر وارد محیط دوم می‌شود. همان‌طور که انتظار داریم آن بخش نور که وارد محیط دوم می‌شود، به دلیل آنکه تندی آن در محیط دوم تغییر می‌کند، شکسته می‌شود (شکل ۳ـ۴۵). به همین دلیل برای هر محیط **ضریب شکست** تعریف می‌کنند که برابر با نسبت تندی نور در خلأ به تندی نور در آن محیط است :



شکل ۳ـ۴۵ در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر، بخشی از نور بازمی‌تابد و بخشی می‌شکنند.

$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v} \qquad \text{(تعریف ضریب شکست)} \qquad (۳ـ۱۴)$$

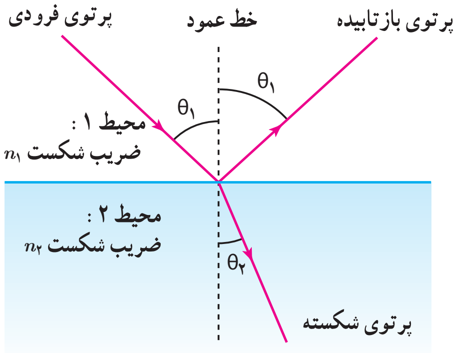
که در آن c تندی نور در خلأ با مقدار دقیق ۲۹۹ ۷۹۲ ۴۵۸ m/s است که در محاسبات، آن را برابر با $۳/۰۰ \times ۱۰^{۸}$ m/s در نظر می‌گیریم؛ چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است). جدول ۳ــ۳ ضریب شکست برای چند مادهٔ مختلف را به‌دست می‌دهد. بنابراین برای دو محیط خاص ۱ و ۲، ضریب شکست‌ها به‌ترتیب $n_1 = c/v_1$ و $n_2 = c/v_2$ است که v_1 و v_2 تندی نور در آن دو محیط است. حال اگر پرتوی نوری از محیط ۱ با زاویهٔ تابش θ_1 وارد محیط ۲ شود و با زاویهٔ θ_2 شکست پیدا کند (شکل ۳ــ۴۶)، از قانون شکست عمومی (رابطهٔ ۳ــ۱۳) درمی‌یابیم :

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c/n_2}{c/n_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

و یا

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \text{(قانون شکست اسنل)} \qquad (۳ــ۱۵)$$

این رابطه را به افتخار فیزیک‌دان هلندی، ویلبرد اسنل (۱۶۲۶ــ۱۵۸۰م.) که آن را به‌طور تجربی کشف کرد، قانون شکست اسنل می‌نامند.



شکل ۳ــ۴۶ طرحی از بازتاب و شکست نور، در عبور یک پرتوی نور از محیطی شفاف به محیط شفافی دیگر

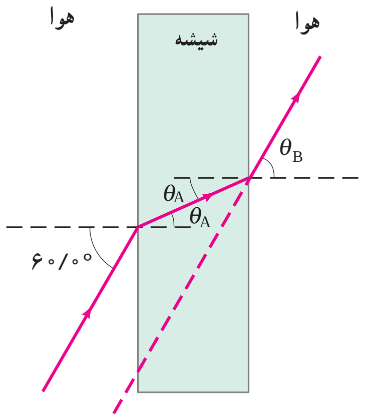
جدول ۳ــ۳ ضریب شکست چند مادهٔ مختلف*

محیط	ضریب شکست
خلأ	دقیقاً ۱
هوا (شرایط متعارف)	۱/۰۰۰۲۹
یخ	۱/۳۱
آب (۲۰°C)	۱/۳۳
استون	۱/۳۶
اتانول	۱/۳۶
محلول آب‌قند (۳۰٪)	۱/۳۸
محلول آب‌قند (۸۰٪)	۱/۴۹
بنزن	۱/۵۰
پلاستیک پلکسی گلاس	۱/۵۱
شیشهٔ خالص	۱/۵۲
سدیم کلرید (نمک خوراکی)	۱/۵۴
کوارتز (SiO_2)	۱/۵۴
الماس	۲/۴۲

* برای طول‌موج ۵۸۹nm (نور زرد سدیم)

مثال ۳ــ۱۱

پرتوی نوری مطابق شکل، از هوا بر تیغهٔ شیشه‌ای متوازی‌السطوحی، با زاویهٔ تابش $۶۰/۰^\circ$ فرود می‌آید. الف) زاویهٔ شکست (θ_A) پرتو در شیشه چقدر است؟ ب) زاویه خروجی (θ_B) پرتو از شیشه چقدر است؟



پاسخ : الف) برای ورود پرتوی نور از هوا به شیشه قانون شکست اسنل را به‌کار می‌بریم. با توجه به جدول ۳ــ۳ ضریب شکست هوا $n_1 = ۱/۰۰$ و ضریب شکست شیشه $n_2 = ۱/۵۲$ است.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow (۱/۰۰)(\sin ۶۰/۰^\circ) = (۱/۵۲)(\sin\theta_A)$$

$$\sin\theta_A = ۰/۵۶۹۸ \Rightarrow \theta_A = ۳۴/۷^\circ$$

ب) برای خروج پرتوی نور از شیشه نیز دوباره قانون اسنل را به‌کار می‌بریم. توجه کنید که زاویهٔ تابش در اینجا برابر زاویهٔ شکست در شیشه است؛ یعنی $\theta_1 = \theta_A$.

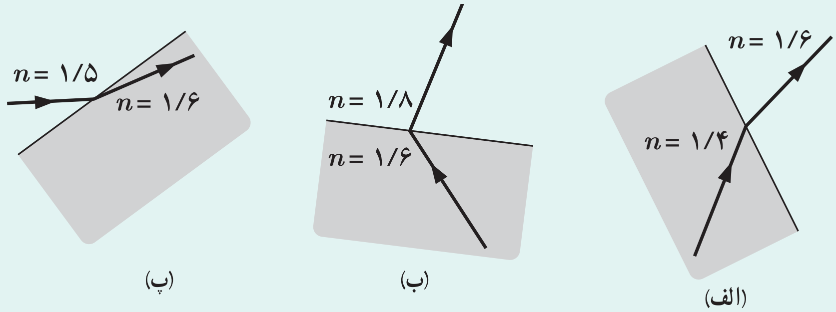
$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow (۱/۵۲)(۰/۵۶۹۸) = (۱/۰۰)(\sin\theta_B)$$

$$\sin\theta_B = ۰/۸۶۶۱ \Rightarrow \theta_B = ۶۰/۰^\circ$$

البته با اندکی دقت و بدون محاسبه نیز می‌توانستید مقدار θ_B را بیابید.

پرسش ۳ــ۱۰

کدام‌یک از سه شکل زیر یک شکست را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟

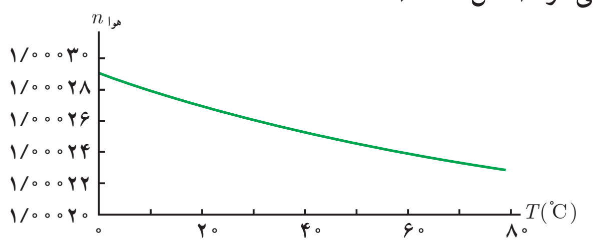


فعالیت ۳ــ۱۱

اندازه‌گیری ضریب شکست : با توجه به مثال ۳ــ۱۱، آزمایشی را طراحی و اجرا کنید که به کمک آن بتوان ضریب شکست یک تیغهٔ متوازی‌السطوح شفاف را اندازه گرفت.

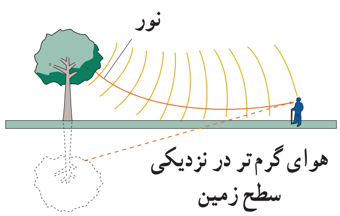
سراب : در روزهای گرم ممکن است برکهٔ آبی را در دوردست ببینید که بر سطح زمین قرار دارد، اما وقتی به آن محل می‌رسید، آنجا را خشک می‌یابید. به این پدیده سراب یا سراب آبگیر[1] می‌گویند و نه‌تنها می‌توان آن را دید، بلکه می‌توان از آن عکس هم گرفت (شکل ۳ــ۴۷). در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. از طرفی، چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست نیز می‌شود (شکل ۳ــ۴۸).


شکل ۳ــ۴۷ تصویر یک خودرو در سراب بر سطح گرم جاده



شکل ۳ــ۴۸ نمودار تغییرات ضریب شکست هوا با دما

در شکل ۳ــ۴۹ پدیدهٔ سراب را مبتنی بر جبهه‌های موج نشان داده‌ایم. برای توضیح این شکل، نخست جبهه‌های موجی را در نظر می‌گیریم که به طرف پایین می‌آیند. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای متناظر این جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق خم می‌شوند (شکل ۳ــ۵۰ الف). وقتی پرتوها در نزدیکی سطح زمین تقریباً افقی می‌شوند به سمت بالا خم برمی‌دارند. این خم شدن رو به بالا را می‌توان با استفاده از جبهه‌های موج توضیح داد. بخش پایینی هر جبههٔ موج در هوای کمی گرم‌تر قرار دارد و بنابراین کمی تندتر از بخش بالایی جبههٔ موج حرکت می‌کند و این تفاوت رفتار دو قسمت جبهه‌های موج،



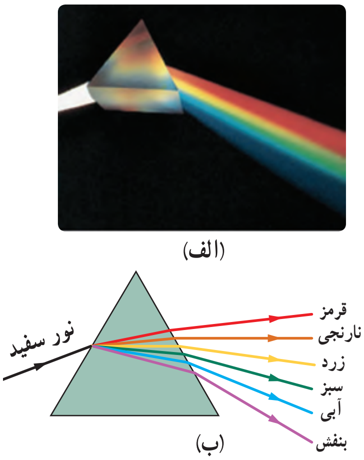
شکل ۳ــ۴۹ مدل‌سازی پدیدهٔ سراب به کمک جبهه‌های موج. ناظری که پرتوهای نور در پدیدهٔ سراب به چشمش می‌رسد، گمان می‌برد که این پرتوها از یک تصویر آمده‌اند.

۱ــ Oasis mirage



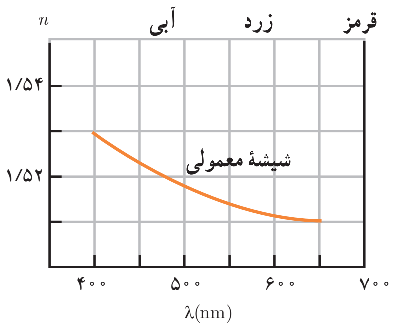
شکل ۳ــ۵۰ الف) خمیدگی اغراق‌آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم به سمت هوای گرم‌تر پایین می‌رود. ب) تغییر جبهه‌های موج و خمیدگی مربوط به آن، به این دلیل رخ می‌دهد که انتهای پایین جبهه‌های موج در هوای گرم‌تر سریع‌تر حرکت می‌کنند. پ) خمیدگی اغراق‌آمیز یک پرتوی نور که در امتداد یک مرز فرضی از هوای گرم‌تر به سمت هوای گرم بالا می‌رود.

موجب خم شدن رو به بالای پرتوهای موج می‌شود، زیرا پرتوهای موج باید همواره عمود بر جبهه‌های موج باشند (شکل ۳ــ۵۰ ب). وقتی پرتوها رو به بالا می‌روند به خم‌شدن رو به بالای خود ادامه می‌دهند، زیرا اکنون مدام با محیط‌هایی با ضریب شکست‌های بزرگ و بزرگ‌تر مواجه می‌شوند و بنابراین در هر مرحله با نزدیک شدن به خط عمود، بیشتر و بیشتر رو به بالا خم می‌شوند (شکل ۳ــ۵۰ پ) اگر بخشی از این نور به چشم ما برسد، به نظر می‌آید که منشأ این نور از امتداد رو به عقب پرتوهایی است که به چشم ما رسیده‌اند و همان‌طور که در شکل ۳ــ۴۹ نشان داده شده است این حس را ایجاد می‌کند که گویی از سطح زمین آمده است.



شکل ۳ــ۵۱ الف) باریکه‌ای از نور سفید که بر یک منشور شیشه‌ای تابیده است، به مؤلفه‌های رنگی خود پاشیده است. ب) طرحی از پاشیدگی نور سفید در یک منشور با قاعدهٔ مثلثی

پاشندگی نور : همان‌طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکهٔ نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود (شکل ۳ــ۵۱ الف). دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به‌جز خلأ به طول‌موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول‌موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش‌شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معیّن برای طول‌موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. نمودار شکل ۳ــ۵۲ این وابستگی ضریب شکست به طول‌موج نور را برای شیشهٔ معمولی نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار اگر مثلاً دو باریکهٔ نور آبی و قرمز با زاویهٔ تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکهٔ آبی بیشتر از باریکهٔ قرمز خم می‌شود.



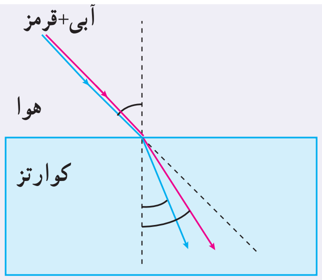
شکل ۳ــ۵۲ تغییرات ضریب شکست در طیف مرئی نور برحسب طول‌موج برای شیشهٔ معمولی

اگر باریکهٔ نور سفید از هوا بر یک سطح شیشه‌ای فرود آید بر اثر شکست نور، مؤلفه‌های سازندهٔ باریکهٔ نور سفید هر کدام به میزان متفاوتی خم می شوند که البته این تفاوت چندان محسوس نیست. برای افزایش جدایی رنگ‌ها در پاشندگی نور، معمولاً از یک منشور با سطح مقطع مثلثی استفاده می‌کنیم. پاشندگی ناچیز در سطح اول، سپس با پاشندگی در سطح دوم افزایش می‌یابد و مؤلفه‌های رنگی نور سفید به‌طور محسوسی از هم جدا می‌شوند (شکل ۳ــ۵۱ ب)[1].

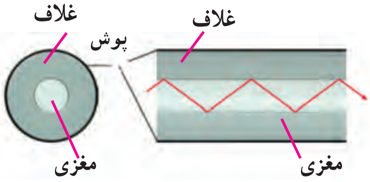
۱ــ محاسبهٔ زاویه‌ها در شکست نور به‌وسیلهٔ منشور، خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

تمرین ۳ـ۱۱

شکل روبه‌رو باریکهٔ نوری متشکل از دو پرتوی قرمز و آبی را نشان می‌دهد که از هوا و با زاویهٔ تابش 45° بر سطح تیغهٔ تختی از کوارتز می‌تابد. زاویه‌های شکست برای این دو پرتو را محاسبه کنید. ضریب شکست نورهای قرمز و آبی در کوارتز به‌ترتیب برابرند با $n_{قرمز} = 1/459$ و $n_{آبی} = 1/467$.

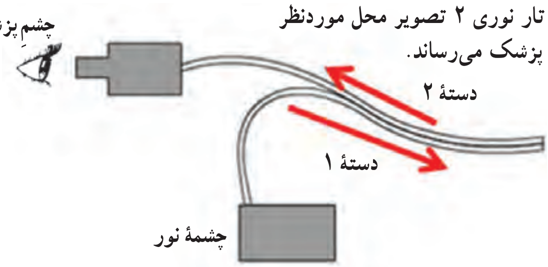


تار نوری : وقتی نور از محیطی با ضریب شکست بیشتر به‌طور مایل وارد محیطی با ضریب شکست کمتر شود، به ازای زاویهٔ تابش خاصی موسوم به زاویهٔ حد، زاویهٔ شکست 90° می‌شود و از آن پس برای هر زاویهٔ تابش بزرگ‌تری همهٔ نور فرودی بازمی‌تابد که به این پدیده، بازتاب داخلی *کلی* گفته می‌شود. تار نوری که هم در پزشکی و هم در فنّاوری ارتباطات نقش مهمی دارد، بر اساس این پدیده عمل می‌کند. در مرکز یک تار نوری، مغزی استوانه‌ای شفافی از جنس شیشه یا پلاستیک با ضریب شکست نسبتاً بالا قرار دارد. ضخامت این مغزی می‌تواند تا چند میکرومتر باشد. اطراف مغزی با غلافی پوشیده شده است که آن نیز شفاف است، ولی ضریب شکستِ بسیار کوچک‌تری از ضریب شکست مغزی دارد تا زاویهٔ حد به اندازهٔ کافی کوچک باشد. نور طوری از یک سر مغزی وارد می‌شود که به مرز مغزی ــ غلاف تحت زاویه‌ای بزرگ‌تر از زاویهٔ حد بتابد و در نتیجه تماماً به درون مغزی بازتاب کند. سپس همین اتفاق در مرز روبه‌روی مرز قبلی رخ می‌دهد و نور بر اثر بازتاب داخلی کلی دوباره به مغزی بازتابیده می‌شود و این رفت و برگشت نور در مسیری زیگزاگ ادامه می‌یابد (شکل الف) تا اینکه به سر دیگر تار برسد. در یک تار نوری خوب، نور در مغزی کمی جذب پیدا می‌کند و بنابراین می‌تواند پیش از آنکه شدتش کاهش یابد، تا مسافت‌های طولانی حرکت کند. تارهای نوری اغلب به‌صورت دسته‌ای کنار هم قرار می‌گیرند تا به شکل یک کابل درآیند. چون تارها بسیار نازک‌اند کابل‌ها نسبتاً کوچک و انعطاف‌پذیر هستند و به این ترتیب می‌توانند در بسیاری موارد، برای انتقال اطلاعات جایگزین کابل‌های فلزی بزرگ شوند (شکل ب). یکی از کاربردهای مهم تارهای نوری در عمل آندوسکوپی در پزشکی است. از آندوسکوپ برای دیدن درون بدن، بدون انجام جراحی استفاده می‌شود. در آندوسکوپی، جراح دو دسته تار نوری را وارد بدن بیمار می‌کند که یکی نور را به محل موردنظر می‌رساند و دیگری تصویر محل موردنظر را به یک چشمی یا صفحهٔ نمایشگر می‌رساند. شکل پ، طرح ساده شده‌ای از چگونگی این تصویربرداری و شکل ت، یک اسباب آندوسکوپی معمولی را نشان می‌دهد.



الف) طرحی از ساختار یک تار نوری و مسیر زیگزاگی که نور در آن می‌پیماید.


ب) یک کابل سبک تار نوری (شکل سمت چپ) می‌تواند مکالمه‌های تلفنی بسیار بیشتری را از یک کابل سیمی معمولی (شکل سمت راست) انتقال دهد.



پ) طرح ساده‌شده‌ای از طرز کار یک آندوسکوپ



ت) یک اسباب آندوسکوپ معمولی

پرسش‌ها و مسئله‌های فصل ۳

۳ـ۱ و ۳ـ۲ نوسان دوره‌ای و حرکت هماهنگ ساده

۱. یک وزنهٔ ۲۰N را از انتهای یک فنر قائم می‌آویزیم، فنر ۲۰cm کشیده می‌شود. سپس این فنر را در حالی که به یک وزنهٔ ۵/۰N متصل است روی میز بدون اصطکاکی به نوسان درمی‌آوریم. دورهٔ تناوب این نوسان چقدر است؟

۲. هرگاه جسمی به جرم m به فنری متصل شود و به نوسان درآید، با دورهٔ تناوب ۲/۰s نوسان می‌کند. اگر جرم این جسم ۲/۰kg افزایش یابد، دورهٔ تناوب ۳/۰s می‌شود. مقدار m چقدر است؟

۳. جرم خودرویی همراه با سرنشینان آن ۱۶۰۰kg است. این خودرو روی چهار فنر با ثابت $۲/۰۰\times ۱۰^{۴}\text{N/m}$ سوار شده است. دورهٔ تناوب، بسامد، و بسامد زاویه‌ای ارتعاش خودرو وقتی از چاله‌ای می‌گذرد چقدر است؟ فرض کنید وزن خودرو به‌طور یکنواخت روی فنرهای چهارچرخ توزیع شده است.

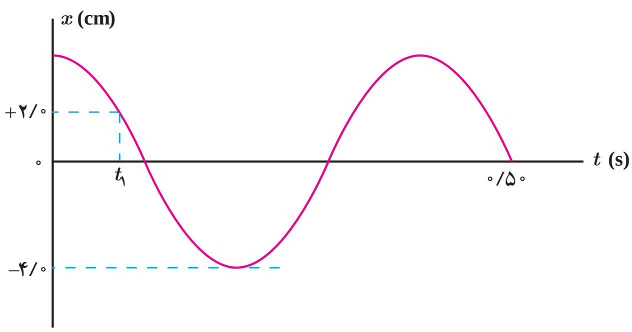
۴. دامنهٔ نوسان یک حرکت هماهنگ ساده $۳/۰\times ۱۰^{-۲}\text{m}$ و بسامد آن ۵/۰Hz هرتز است. معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید و نمودار مکان ــ زمان آن را در یک دوره رسم کنید.

۵. نمودار مکان ــ زمان نوسانگری مطابق شکل زیر است:

الف) معادلهٔ حرکت این نوسانگر را بنویسید.

ب) مقدار t_1 را به‌دست آورید.

پ) اندازهٔ شتاب نوسانگر را در لحظهٔ t_1 محاسبه کنید.



۳ـ۳ انرژی در حرکت هماهنگ ساده ــ آونگ ساده

۶. دامنهٔ نوسان وزنه‌ای که به یک فنر با ثابت فنر ۷۴N/m متصل است و در راستای افقی نوسان می‌کند، برابر با ۸/۰cm است. اگر انرژی پتانسیل این نوسانگر در نقطه‌ای از مسیر نوسان، $۸/۰\times ۱۰^{-۲}\text{J}$ باشد، انرژی جنبشی آن در این مکان چقدر است؟ (از نیروهای اتلافی چشم‌پوشی شود.)

۷. جسمی به جرم ۱/۰kg به فنری افقی با ثابت ۶/۰N/cm متصل است. فنر به اندازهٔ ۹/۰cm فشرده و سپس رها می‌شود و جسم روی سطح افقی شروع به نوسان می‌کند. با چشم‌پوشی از اصطکاک

الف) دامنهٔ نوسان و تندی بیشینهٔ جسم چقدر است؟

ب) وقتی تندی جسم ۱/۶m/s است، انرژی پتانسیل کشسانی آن چقدر است؟

۸. معادلهٔ حرکت هماهنگ سادهٔ یک نوسانگر در SI به‌صورت $x=(۰/۰۵۰\text{m})\cos ۲۰\pi t$ است.

الف) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به بیشترین مقدار خود می‌رسد؟

ب) در چه زمانی، پس از لحظهٔ صفر، برای نخستین بار تندی نوسانگر به صفر می‌رسد؟

پ) تندی نوسانگر چقدر باشد تا انرژی جنبشی نوسانگر برابر با انرژی پتانسیل آن شود؟

۹. الف) ساعتی آونگ‌دار (با آونگ ساده) در تهران تنظیم شده است. اگر این ساعت به منطقه‌ای در استوا برده شود، عقب می‌افتد یا جلو؟ مقدار این عقب یا جلو افتادن در یک شبانه‌روز چقدر است؟
($g_{\text{تهران}}=۹/۸۰\text{m/s}^2$ و $g_{\text{استوا}}=۹/۷۸\text{m/s}^2$)

ب) به نظر شما آیا با افزایش دما، یک ساعت آونگ‌دار جلو می‌افتد یا عقب؟

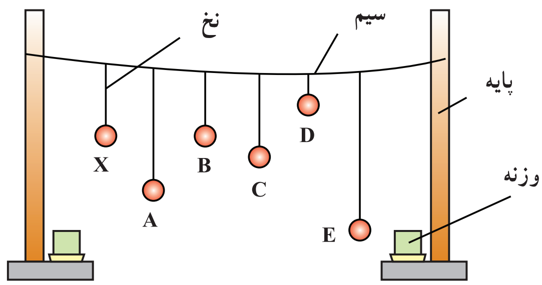
۳ـ۴ تشدید

۱۰. هر فرد معمولاً با چرخشِ اندک بدنش به چپ و راست، راه می‌رود و بدین ترتیب نیروهای کوچکی به زمینِ زیر پایش وارد می‌کند. این نیروها بسامدی در حدود ۰/۵Hz دارند. لرزش شدید پل هوایی میلینیوم[1] در آغاز هزارهٔ جدید را به عبور منظم گروهی از افراد از این پل ربط داده‌اند. چگونه ممکن است نوسان‌های بدن این افراد موجب چنین لرزشی شده باشد؟



۱ـ Millennium bridge

۱۱. مطابق شکل چند آونگ را از سیمی آویخته‌ایم. توضیح دهید با به نوسان درآوردن آونگ X، آونگ‌های دیگر چگونه نوسان می‌کنند؟



۳ـ۵ و ۳ـ۶ موج و انواع آن، و مشخصه‌های موج

۱۲. یک نوسان‌ساز موج‌هایی دوره‌ای در یک ریسمان کشیده ایجاد می‌کند.

الف) با افزایش بسامد نوسان‌ساز کدام‌یک از کمیت‌های زیر تغییر نمی‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موجِ موج.

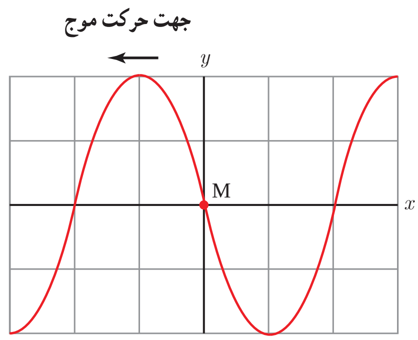
ب) حال اگر به جای افزایش بسامد، کشش ریسمان را افزایش دهیم، هر یک از کمیت‌های زیر چه تغییری می‌کند؟ بسامد موج، تندی موج، طول‌موج موج.

۱۳. شکل زیر یک تصویر لحظه‌ای از موجی عرضی در یک ریسمان کشیده شده را نشان می‌دهد. موج به سمت چپ حرکت می‌کند.

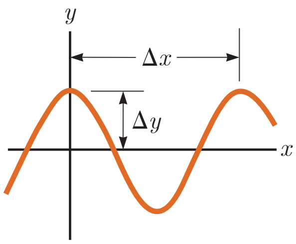
الف) با رسم این موج در زمان $T/۴$ بعد، نشان دهید جزء M ریسمان در این مدت در چه جهتی حرکت کرده است. همچنین روی این موج، دامنهٔ موج و طول‌موج را نشان دهید.

ب) اگر طول‌موج ۵/۰cm و تندی موج ۱۰cm/s باشد، بسامد موج را به‌دست آورید.

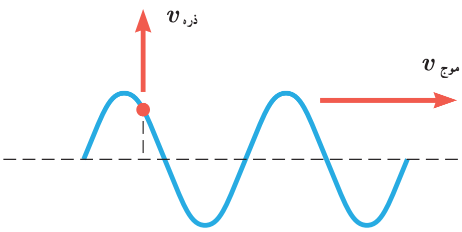
پ) تعیین کنید موج در مدت $T/۴$ چه مسافتی را پیموده است؟



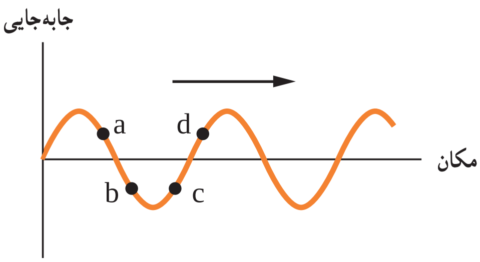
۱۴. در نمودار جابه‌جایی ــ مکانِ موجِ عرضیِ شکل زیر Δx=۴۰/۰cm و Δy=۱۵/۰cm است. اگر بسامد نوسان‌های چشمه ۸/۰۰Hz باشد، طول‌موج، دامنه، تندی و دورهٔ تناوب موج چقدر است؟



۱۵. شکل زیر موجی عرضی در یک ریسمان را نشان می‌دهد که با تندی $v_{\text{موج}}$ به سمت راست حرکت می‌کند، درحالی‌که تندیِ ذرهٔ نشان داده شدهٔ ریسمان $v_{\text{ذره}}$ است. آیا این دو تندی با هم برابرند؟ توضیح دهید.

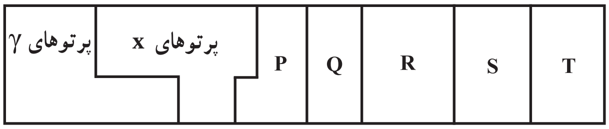


۱۶. شکل زیر یک موج سینوسی را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد که در جهت محور x در طول ریسمان کشیده شده‌ای حرکت می‌کند. چهار جزء از این ریسمان روی شکل نشان داده شده‌اند. در این لحظه هر یک از این چهار جزء بالا می‌روند یا پایین؟



۱۷. سیمی با چگالی $۷/۸۰ g/cm^۳$ و سطح مقطع $۰/۵۰ mm^۲$ بین دو نقطه با نیروی ۱۵۶ N کشیده شده است. تندی انتشار موج عرضی را در این سیم محاسبه کنید.

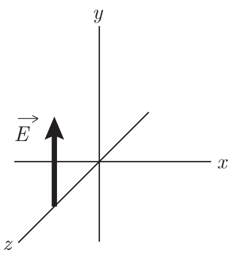
۱۸. شکل زیر طیف موج‌های الکترومغناطیسی را به‌طور تقریبی نشان می‌دهد.



الف) نام قسمت‌هایی از طیف را که با حروف علامت‌گذاری شده‌اند، بنویسید.

ب) اگر در طول طیف از چپ به راست حرکت کنیم، مقدار کدام مشخصه‌های موج افزایش یا کاهش می‌یابد و کدام ثابت می‌ماند؟

۱۹. شکل زیر میدان الکتریکی یک موج الکترومغناطیسی سینوسی را در نقطه‌ای معیّن و دور از چشمه، در یک لحظه نشان می‌دهد. موج انرژی را در خلاف جهت محور z انتقال می‌دهد. جهت میدان مغناطیسی موج را در این نقطه و این لحظه تعیین کنید.



۲۰. الف) طول‌موج نور نارنجی در هوا حدود m $۶/۲۰ \times ۱۰^{-۷}$ است، بسامد این نور چند هرتز است؟

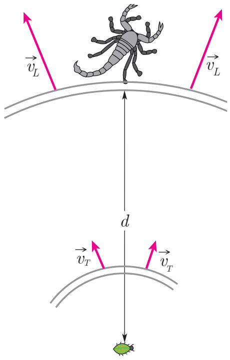
ب) بسامد نور قرمز در حدود Hz $۴/۳۰ \times ۱۰^{۱۴}$ است. طول‌موج این نور را در هوا و آب حساب کنید. (سرعت نور را در هوا m/s $۳/۰ \times ۱۰^{۸}$ و در آب m/s $۲/۲۵ \times ۱۰^{۸}$ فرض کنید.)

۲۱. چشمهٔ موجی با بسامد Hz ۱۰ در یک محیط که تندی انتشار موج در آن m/s ۱۰۰ است، نوسان هایی طولی ایجاد می کند. اگر دامنهٔ نوسان ها cm ۴/۰ باشد،

الف) فاصلهٔ بین دو تراکم متوالی این موج چقدر است؟

ب) فاصلهٔ بین یک تراکم و یک انبساط متوالی چقدر است؟

۲۲. عقرب‌های ماسه‌ای وجود طعمه را با امواجی که بر اثر حرکت طعمه در ساحل شنی ایجاد می‌شود، احساس می‌کنند. این امواج که در سطح ماسه منتشر می‌شوند، بر دو نوع‌اند: امواج عرضی با تندی v_T = ۵۰m/s و امواج طولی با تندی v_L = ۱۵۰m/s. عقرب ماسه‌ای می‌تواند با استفاده از اختلاف زمانی بین زمان رسیدن این امواج به نزدیک‌ترین پای خود، فاصلهٔ خود از طعمه را تعیین کند. اگر این اختلاف زمان برابر Δt = ۴/۰ms باشد، طعمه در چه فاصله‌ای از عقرب قرار دارد؟



۲۳. توضیح دهید کدام یک از عامل های زیر بر تندی صوت در هوا مؤثر است.

الف) شکل موج ب) دامنهٔ موج پ) بسامد موج ت) دمای هوا

۲۴. در سونوگرافی معمولاً از کاوه‌ای[۱] دستی موسوم به *تراگذار فراصوتی*[۲] برای تشخیص پزشکی استفاده می‌شود که دقیقاً روی ناحیهٔ موردنظر از بدن بیمار گذاشته و حرکت داده می‌شود. این کاوه در بسامد ۶/۷MHz عمل می کند.

الف) بسامد زاویه‌ای در این کاوهٔ نوسان چقدر است؟

ب) اگر تندی موج صوتی در بافتی نرم از بدن ۱۵۰۰m/s باشد، طول‌موج این موج در این بافت چقدر است؟



۱ــ probe

۲ــ Ultrasonic Transducer

۲۵. تندی صوت در یک فلز خاص، برابر $v_{\text{فلز}}$ است. به یک سر لولهٔ توخالی بلندی از جنس این فلز به طول L ضربهٔ محکمی می‌زنیم. شنونده‌ای که در سر دیگر این لوله قرار دارد دو صدا را می‌شنود. یکی ناشی از موجی است که از دیوارهٔ لوله می‌گذرد و دیگری از موجی است که از طریق هوای داخل لوله عبور می‌کند.

الف) اگر تندی صوت در هوا $v_{\text{هوا}}$ باشد، بازهٔ زمانی Δt بین دریافت این دو صدا در گوش شنونده چقدر خواهد بود؟

ب) اگر $\Delta t = ۱/۰۰\,\text{s}$ و فلز از جنس فولاد باشد، طول L لوله چقدر است؟ ($v_{\text{هوا}} = ۳۴۰\,\text{m/s}$)

۲۶. موجی صوتی با توان $۱/۲\times۱۰^{-۴}\,\text{W}$ از دو صفحهٔ فرضی شکل ۳ــ۲۶ می‌گذرد. با فرض اینکه مساحت صفحه‌ها به‌ترتیب $A_1=۴/۰\,\text{m}^۲$ و $A_2=۱۲\,\text{m}^۲$ باشد، شدت صوت در دو سطح را تعیین کنید و توضیح دهید چرا شنونده در محل صفحهٔ دوم، صدا را آهسته‌تر می‌شنود.

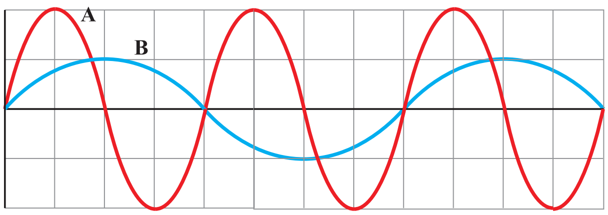
۲۷. شدت صدای حاصل از یک متهٔ سنگ‌شکن در فاصلهٔ $۱۰/۰\,\text{m}$ از آن $۱/۰\times۱۰^{-۲}\,\text{W/m}^۲$ است. تراز شدت صوتی آن برحسب dB چقدر می‌شود؟

۲۸. اگر به مدت ۱۰ دقیقه در معرض صوتی با تراز شدت ۱۲۰dB باشیم، آستانهٔ شنوایی به‌طور موقت از ۰dB به ۲۸dB افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که به‌طور متوسط اگر به مدت ۱۰ سال در معرض صدایی با تراز شدت ۹۲dB قرار گیریم، آستانهٔ شنوایی به‌طور دائم به ۲۸dB افزایش می‌یابد. شدت‌های صوت مربوط به ۲۸dB و ۹۲dB چقدر است؟ (راهنمایی : برای پاسخ دادن لازم است از ماشین‌حساب مناسب استفاده کنید.)

۲۹. یک دستگاه صوتی، صدایی با تراز شدت $\beta_1=۹۰/۰\,\text{dB}$ و دستگاه صوتی دیگر، صدایی با تراز شدت $\beta_2=۹۵/۰\,\text{dB}$ ایجاد می‌کند. شدت‌های مربوط به این دو تراز (برحسب $\text{W/m}^۲$) به ترتیب I_1 و I_2 هستند. نسبت I_2/I_1 را تعیین کنید.

۳۰. در یک آتش‌بازی، موشکی در بالای آسمان منفجر می‌شود. فرض کنید صوت به‌طور یکنواخت در تمام جهت‌ها منتشر شود. از جذب انرژی صوتی در محیط و نیز از بازتابی که ممکن است امواج صوتی از زمین پیدا کند چشم‌پوشی کنید. با فرض اینکه صوت با شدت $I=۰/۱۰\,\text{W/m}^۲$ به شنونده‌ای برسد که به فاصلهٔ $r_1=۶۴۰\,\text{m}$ از محل انفجار قرار دارد، این صوت به شنونده‌ای که در فاصلهٔ $r_2=۱۶۰\,\text{m}$ از محل انفجار قرار دارد با چه شدتی می‌رسد؟

۳۱. نمودار جابه‌جایی ــ مکان دو موج صوتی A و B که در یک محیط منتشر شده‌اند، به‌صورت زیر است. دامنه، طول‌موج، بسامد و شدت این دو موج صوتی را با هم مقایسه کنید.



۳۲. شکل زیر جهت‌های حرکت یک چشمهٔ صوتی و یک ناظر (شنونده) را در وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

	ناظر (شنونده)	چشمه
(الف)	•	•
(ب)	•	•→
(پ)	•	←•
(ت)	•→	•
(ث)	←•	•
(ج)	←•	•→
(چ)	•→	←•

بسامدی راکه ناظر در حالت‌های مختلف می‌شنود با حالت الف مقایسه کنید.

۳ـ۷ بازتاب موج

۳۳. دانش‌آموزی بین دو صخرهٔ قائم ایستاده است و فاصلهٔ او از صخرهٔ نزدیک‌تر ۲۴۰m است. دانش‌آموز فریاد می‌زند و اولین پژواک صدای خود را پس از ۱/۵۰s و صدای پژواک دوم را ۱/۰۰s بعد از پژواک اول می‌شنود.

الف) تندی صوت در هوا چقدر است؟

ب) فاصلهٔ بین دو صخره را بیابید.

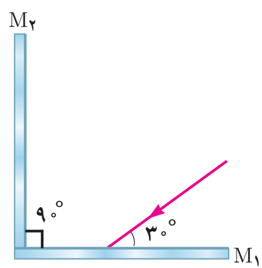
۳۴. اگر در فاصلهٔ مناسبی از یک رشته پلکان بلند بایستید و یک بار کف بزنید، پژواکی بیشتر از یک صدای برهم زدن دست می‌شنوید. نمونهٔ جالبی از این پدیده در برابر رشته پله‌های معبد قدیمی *کوکولکان*[1] در مکزیک رخ می‌دهد. این معبد از ۹۲ پلهٔ سنگی تشکیل شده است. در مورد چنین پژواکی توضیح دهید.



تصویری از معبد کوکولکان

۳۵. وقتی یک باریکهٔ لیزر را به دیوار کلاس می‌تابانیم، همهٔ دانش‌آموزان نقطهٔ رنگی ایجاد شده روی دیوار را می‌بینند. دلیل آن چیست؟

۳۶. در شکل زیر پرتوهای بازتابیده از آینه‌های تخت M_1 و M_2 را رسم کنید.

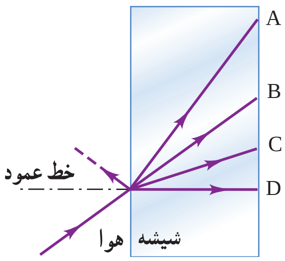


۱ــ Kukulkan Temple

۳ـ۸ شکست موج

۳۷. با رسم شکلی از جبهه‌های موج توضیح دهید چگونه جهت انتشار جبهه‌های موج با رسیدن به یک ساحل شیب‌دار، تغییر می‌کند.

۳۸. شکل زیر پرتویی را نشان می‌دهد که از هوا وارد شیشه شده است. کدام گزینه‌های A تا D، می‌تواند پرتوی داخل شیشه را نشان دهد؟



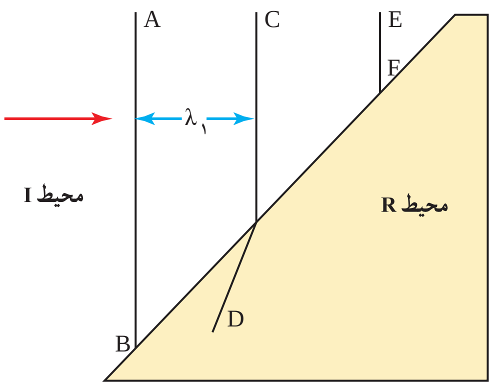
۳۹. ضریب شکست آب ۱/۳ و ضریب شکست شیشه ۱/۵ است. اگر نوری به‌طور مایل از آب به مرز شیشه با آب بتابد، با رسم نموداری، جبهه‌های موج را در دو محیط نشان دهید.

۴۰. شکل زیر جبهه‌های موجی را نشان می‌دهد که بر مرز بین محیط I و محیط R فرود آمده‌اند.

الف) ادامهٔ جبههٔ موج EF را در محیط R رسم کنید.

ب) توضیح دهید در کدام محیط تندی موج بیشتر است.

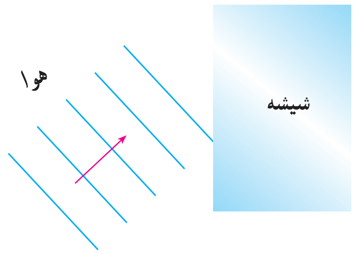
پ) آیا با استفاده از این نمودار می‌توان نسبت تندی موج عبوری به موج فرودی را محاسبه کرد؟



۴۱. در شکل زیر موج نوری فرودی از هوا وارد شیشه می‌شود. بخشی از موج در سطح جدایی دو محیط بازمی‌تابد و بخشی دیگر شکست می‌یابد و وارد شیشه می‌شود.

الف) مشخصه‌های موج بازتابیده و موج شکست‌یافته را با موج فرودی مقایسه کنید.

ب) جبهه‌های موج بازتابیده و شکست‌یافته را رسم کنید.

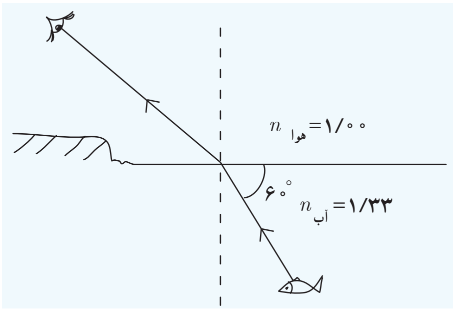


۴۲. طول‌موج نور قرمز لیزر هلیم ــ نئون در هوا حدود ۶۳۳nm است، ولی در زجاجیهٔ چشم ۴۷۴nm است. الف) بسامد این نور چقدر است؟ ب) ضریب شکست زجاجیه برای این نور چقدر است؟ پ) تندی این نور در زجاجیه را محاسبه کنید.

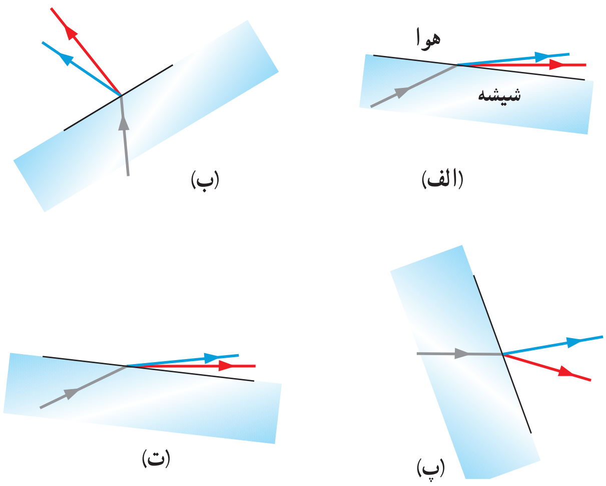
۴۳. سکه‌ای را در گوشهٔ فنجانی خالی قرار دهید و طوری مقابل آن قرار گیرید که نتوانید سکه را ببینید. سپس بی‌آنکه سرتان را حرکت دهید به‌آرامی در فنجان آب بریزید، به‌طوری که آب ریختن شما موجب جابه‌جایی سکه نشود. با پرشدن فنجان، سکه را خواهید دید. با رسم پرتوها علت دیده شدن سکه را توضیح دهید.



۴۴. مطابق شکل، پرتو نوری که از ماهی به چشمان شخص می‌رسد تحت زاویهٔ 60° به مرز آب ــ هوا برخورد کرده است. زاویهٔ شکست این پرتو در هوا چقدر است؟



۴۵. در شکل‌های زیر، پرتوی فرودی که شامل نورهای قرمز و آبی است از شیشه وارد هوای رقیق شده است. کدام شکل، شکستی را نشان می‌دهد که از لحاظ فیزیکی ممکن است؟



۴۶. دو دانش‌آموز به نور زرد نگاه می‌کنند. یکی از آنها نور زرد را ترکیب دو نور قرمز و سبز و دیگری آن را از یک نوع رنگ می‌داند. به نظر شما با چه تجربه‌ای می‌توان بین این دو نظر، یکی را انتخاب کرد؟

۴

فصل

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای



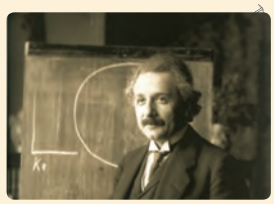
چاقوی گاما (جراحی مغز بدون چاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

تا دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، بیشتر حوزه‌های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریهٔ الکترومغناطیس ماکسول که امروزه با نام فیزیک کلاسیک از آنها یاد می‌شود به صورت‌بندی نهایی خود رسیده بود و به‌نظر می‌رسید که در توصیف گسترهٔ وسیعی از پدیده‌های فیزیکی کاملاً موفق‌اند. با این حال در آن سال‌ها، پدیده‌هایی مشاهده و آزمایش‌هایی انجام شد که تبیین کامل و درست آنها با نظریه‌های فیزیک کلاسیک ممکن نبود و سبب تغییرات بنیادی در دیدگاه فیزیک‌دانان نسبت به توضیح رفتار برخی از پدیده‌های فیزیکی شد. به‌طوری که در سه دههٔ آغازین قرن بیستم، نتایج این تلاش‌ها به نظریهٔ نسبیت خاص (مربوط به مطالعهٔ پدیده‌ها در تندی‌های بسیار زیاد و قابل مقایسه با تندی نور)، نظریهٔ نسبیت عام (مربوط به مطالعهٔ هندسهٔ فضا ــ زمان و گرانش) و نظریهٔ کوانتومی (مربوط به مطالعهٔ پدیده‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک، مانند اتم‌ها و ذره‌های سازندهٔ آنها) منجر شد که امروزه به آن فیزیک جدید می‌گویند. اندکی پس از ظهور این نظریه‌ها، شاخه‌های دیگری مانند فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات بنیادی و کیهان‌شناسی به‌تدریج به‌وجود آمدند.

در فیزیک هسته‌ای با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشیِ هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه بیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد.

در این فصل ضمن معرفی و بررسی برخی از پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک و طیف خطی گسیلی و جذبی از گازهای اتمی که با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبودند، به معرفی الگوهای اتمی می‌پردازیم و سپس نگاهی به مبانی فیزیکی لیزر خواهیم داشت. پس از آن با ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی آشنا می‌شویم.



آلبرت اینشتین (۱۹۵۵ــ۱۸۷۹ م.)
تا ۱۷ سالگی در آلمان تحصیل کرد ولی با ناتمام گذاشتن سال آخر تحصیل خود، آلمان را ترک کرد و به سوئیس رفت. نظام آموزشی انعطاف‌پذیر سوئیس تحولی شگرف در اینشتین ایجاد کرد و توانست پس از پایان دبیرستان، در سال ۱۹۰۲ از پلی تکنیک زوریخ، لیسانس فیزیک خود را دریافت کند. در سال ۱۹۰۵ چندین مقالهٔ مهم منتشر کرد. بعدها یکی از این مقاله‌ها که در آن به توضیح اثر فوتوالکتریک می‌پرداخت، جایزهٔ نوبل فیزیک را در سال ۱۹۲۱ برای او به ارمغان آورد. یکی دیگر از مقاله‌های او در سال ۱۹۰۵، ارائهٔ نظریهٔ نسبیت خاص بود که دربرگیرندهٔ اندیشه‌ای نو و انقلابی دربارهٔ ماهیت فضا و زمان بود. اینشتین همچنین در سال ۱۹۱۵ مقاله‌ای دربارهٔ نظریهٔ نسبیت عام منتشر کرد. او در این مقاله نظریهٔ جدیدی دربارهٔ گرانش ارائه کرد که نظریهٔ نیوتون را به‌عنوان حالتی خاص دربرمی‌گرفت.

۴ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

اگر بر کلاهک برق‌نمایی با بار منفی، نور فرابنفشی تابیده شود، مشاهده می‌شود که انحراف ورقه‌های آن کاهش می‌یابد (شکل ۴ــ۱ الف) در حالی که با تابش نور مرئی، تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما رخ نمی‌دهد (شکل ۴ــ۱ ب). چرا این پدیده اتفاق می‌افتد؟ آزمایش نشان می‌دهد وقتی نوری با بسامد



شکل ۴ــ۱ الف) برهم‌کنش نور فرودی فرابنفش با کلاهک برق‌نما سبب می‌شود تا ورقه‌های آن به‌سرعت به هم نزدیک شوند. ب) در حالی که برهم‌کنش نور مرئی گسیل‌شده از یک لامپ رشته‌ای تغییری در انحراف ورقه‌های برق‌نما به وجود نمی‌آورد.

مناسب مانند نور فرابنفش به سطحی فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند (شکل ۴ــ۲). این پدیدهٔ فیزیکی را، اثر فوتوالکتریک و الکترون‌های جدا شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.

همان‌طور که در فصل ۳ دیدیم نور، موجی الکترومغناطیسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت هنگام برهم‌کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $\vec{F}=-e\vec{E}$ به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنهٔ نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند. بنا به این دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

یکی دیگر از پیامدهای نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنهٔ میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^{۲}$). به این ترتیب انتظار می‌رود به‌ازای یک بسامد معیّن، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه‌ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

پس از نزدیک به ۲۰ سال که تلاش بسیاری از دانشمندان برای توجیه اثر فوتوالکتریک به کمک مفاهیم و قانون های فیزیک کلاسیک به نتیجه نرسیده بود در سال ۱۹۰۵ اینشتین توضیحی قانع کننده در مورد این اثر ارائه داد و جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ میلادی را به خاطر تبیین آن دریافت کرد.

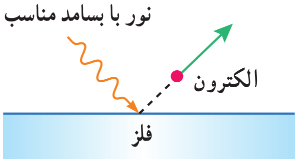
اینشتین در نظریهٔ فوتوالکتریک خود با توجه به کارهای قبلی پلانک در زمینهٔ تابش گرمایی اجسام، فرض کرد که نور با بسامد f را می‌توان به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بستهٔ انرژی، که بعدها فوتون[۱] نامیده شد، دارای انرژی‌ای است که از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$E=hf \qquad \text{(انرژی فوتون)} \qquad (۴ــ۱)$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می‌شود و به‌طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $h=۶/۶۳\times۱۰^{-۳۴}\,\mathrm{J.s}$ است.

بنا بر نظر اینشتین، وقتی نوری تکفام بر سطح فلزی می‌تابد، هر فوتون صرفاً با یکی از الکترون‌های فلز برهم‌کنش می‌کند. اگر فوتون انرژی کافی داشته باشد تا فرایند خارج کردن الکترون از فلز را انجام دهد، الکترون به طور آنی از آن گسیل می‌شود. در این صورت بخشی از انرژی فوتون صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود و مابقی آن به انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده تبدیل می‌شود.

اگر بسامد نور تابیده شده بر سطح فلز از بسامدی موسوم به بسامد آستانه (که به جنس فلز بستگی دارد) کمتر باشد، فوتون‌ها، حداقل انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از فلز را ندارند و پدیدهٔ فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. همچنین برای نوری که فوتون‌های آن دارای حداقل انرژی لازم برای وقوع پدیدهٔ فوتوالکتریک هستند، افزایش شدت نور (با ثابت ماندن بسامد) فقط سبب افزایش تعداد فوتون‌ها و در نتیجه افزایش تعداد فوتوالکترون‌ها می‌شود، درحالی‌که انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها بدون تغییر می‌ماند.



شکل ۴ــ۲ الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند.



ماکس پلانک (۱۹۴۷ــ۱۸۵۵ م.)

در سال ۱۸۸۵ دانشیار فیزیک نظری در دانشگاه کیل شد و علاوه بر تدریس، مقاله‌های مهمی دربارهٔ ترمودینامیک منتشر کرد. از کارهای او در زمینهٔ توزیع طیف تابشی، که به نظریهٔ کوانتومی انجامید، با اهدای جایزهٔ نوبل سال ۱۹۱۸ تقدیر شد. در سال‌های بعد، نوشته‌های پلانک بیشتر در زمینهٔ موضوع‌های مذهبی و فلسفی بود. درست در آستانهٔ دورانی که پلانک از نظر حرفه‌ای مورد تحسین همگان قرار گرفته بود، متأسفانه زندگی شخصی وی با تراژدی آمیخته شد، به طوری که طی سال‌های ۱۹۰۹ تا ۱۹۱۹ همسر، پسر بزرگ و دخترهای دوقلویش به دلایل متفاوتی از دنیا رفتند. پلانک در سال ۱۹۲۷، پس از حدود چهل سال سابقهٔ دانشگاهی، از دانشگاه برلین بازنشسته شد.

۱ــ این نام را شیمی‌دان آمریکایی، گیلبرت لوئیس، در سال ۱۹۲۶ میلادی برای نخستین بار پیشنهاد کرد.

توجه : در فیزیک اتمی و فیزیک هسته‌ای، یکای ژول برای بیان انرژی فوتون‌ها و ذرات، یکای بسیار بزرگی است. به همین دلیل از یکایی به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم. برای آشنایی با این یکای غیر SI، فرض کنید الکترونی با بار $q=-e=-۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{C}$، بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل ۱V حرکت کند. در این صورت بنا به رابطهٔ $\Delta U=q\Delta V$ که در فیزیک ۲ با آن آشنا شدید، اندازهٔ تغییر در انرژی پتانسیل الکتریکی الکترون برابر است با :

$$|\Delta U|=|q\Delta V|=|(-۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{C})(۱\text{V})|=۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$$

این مقدار انرژی را بنا به تعریف، یک الکترون ولت ($۱\text{eV}=۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}$) می‌نامند. مضرب‌های دیگری از این یکا به‌صورت keV (کیلو الکترون ولت) و MeV (مگا الکترون ولت) اغلب به کار می‌رود.

به این ترتیب یکای ثابت پلانک را به جای J.s می‌توان برحسب یکای eV.s نیز بیان کرد :

$$h=(۶/۶۳\times ۱۰^{-۳۴}\text{J.s})\left(\frac{۱\text{eV}}{۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}}\right)=۴/۱۴\times ۱۰^{-۱۵}\text{eV.s}$$

مثال ۴ــ۱

یک چشمهٔ نور مرئی با توان ۱۰۰W، فوتون‌هایی با طول‌موج $\lambda=۵۵۰\text{nm}$ گسیل می‌کند.

الف) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت محاسبه کنید.

ب) چه تعداد فوتون در هر ثانیه از این چشمهٔ نور گسیل می‌شود؟

پاسخ : الف) از رابطهٔ ۴ــ۱ انرژی هر فوتون برابر است با :

$$E=hf=\frac{hc}{\lambda}$$

ابتدا مقدار hc را حساب می‌کنیم :

$$hc=(۶/۶۳\times ۱۰^{-۳۴}\text{J.s})(۳/۰۰\times ۱۰^{۸}\text{m/s})=۱۹/۹\times ۱۰^{-۲۶}\text{J.m}$$

اگر J را برحسب eV و m را برحسب nm بنویسیم، خواهیم داشت :

$$hc=(۱۹/۹\times ۱۰^{-۲۶}\text{J.m})\left(\frac{۱\text{eV}}{۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}}\right)\left(\frac{۱\text{nm}}{۱۰^{-۹}\text{m}}\right)=۱/۲۴\times ۱۰^{۳}\text{eV.nm}$$

بنابراین در حل مسائل می‌توانیم مقدار hc را برابر ۱۲۴۰ eV.nm اختیار کنیم. خوب است این مقدار و یکای آن را به خاطر بسپارید تا در صورت نیاز از آن استفاده کنید. به این ترتیب داریم :

$$E=\frac{۱/۲۴\times ۱۰^{۳}\text{eV.nm}}{۵۵۰\text{nm}}=۲/۲۵\text{eV}$$

ب) ابتدا انرژی تابش‌شده توسط لامپ را در هر ثانیه به‌دست می‌آوریم :

$$E=pt=(۱۰۰\text{W})(۱\text{s})=۱۰۰\text{J}=(۱۰۰\text{J})\left(\frac{۱\text{eV}}{۱/۶۰\times ۱۰^{-۱۹}\text{J}}\right)=۶/۲۵\times ۱۰^{۲۰}\text{eV}$$

نسبت این انرژی به انرژی هر فوتون که در قسمت الف پیدا کردیم، شمار فوتون‌های گسیل‌شده از این چشمه را در هر ثانیه به‌دست می‌دهد. به این ترتیب داریم :

$$n=\frac{۶/۲۵\times ۱۰^{۲۰}\text{eV}}{۲/۲۵\text{eV}}=۲/۷۷\times ۱۰^{۲۰}$$

این شمار زیاد فوتون، که در هر ثانیه از یک چشمهٔ معمولی نور در فضای پیرامون آن گسیل می‌شود حاکی از آن است که در زندگی روزمره آثار ناشی از این شمار بسیار زیاد فوتون برای ما ملموس نیست.

تمرین ۴ـ۱

نوری با طول موج $240\,nm$ به سطحی از جنس فلز تنگستن می‌تابد و سبب گسیل فوتوالکترون‌ها از آن می‌شود.

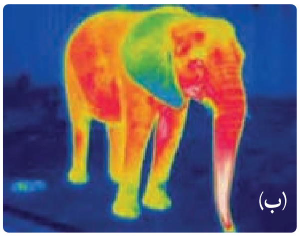
الف) بسامد نور فرودی را پیدا کنید.

ب) اگر توان چشمهٔ نور فرودی $50\,W$ باشد، در هر دقیقه چه تعداد فوتون از این چشمه گسیل می‌شود؟

پ) اگر توان و در نتیجه شدت چشمهٔ نور فرودی به نصف کاهش پیدا کند، شمار فوتون‌های گسیل شده از چشمه در هر دقیقه چه تغییری می‌کند؟

شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربرندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم‌کنش نور با ماده را ارائه کند.

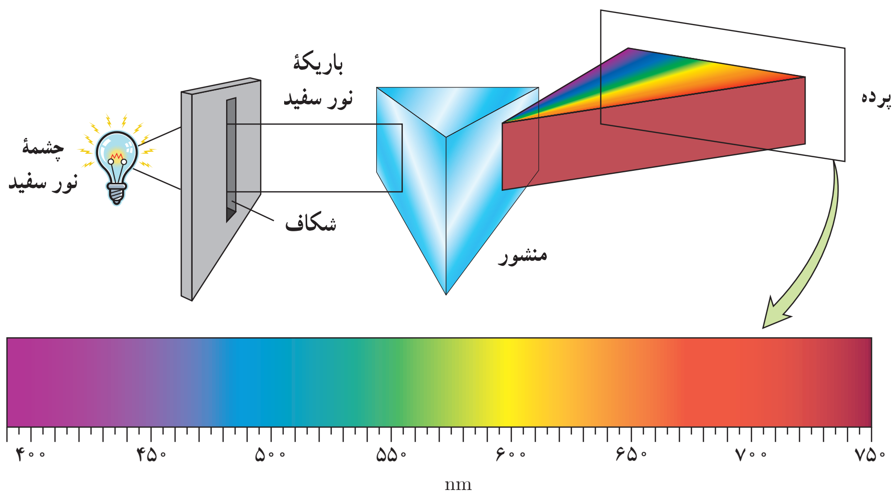




شکل ۴ـ۳ الف) اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. ب) در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل‌شده از سطح اجسام در ناحیهٔ فروسرخ طیف قرار دارد.

۴ـ۲ طیف خطی

در فیزیک ۱ دیدیم که همهٔ اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن تابش گرمایی گفته می‌شود (شکل ۴ـ۳). برای یک جسم جامد، نظیر رشتهٔ داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گسترهٔ پیوسته‌ای از طول موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجادشده در این شرایط را طیف گسیلی پیوسته یا به‌اختصار طیف پیوسته می‌نامند. بخشی از این طیف که در گسترهٔ مرئی طول‌موج‌ها واقع است در شکل ۴ـ۴ نشان داده شده است. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم‌کنش قوی بین اتم‌های سازندهٔ آن است. حال آنکه گازهای کم‌فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم‌کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول موج‌های معیّنی است. این طیف گسسته را، معمولاً طیف گسیلی خطی یا به‌اختصار طیف خطی می‌نامند و طول موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر



شکل ۴ـ۴ طیف گسیلی پیوستهٔ نور سفید از رشتهٔ داغ یک لامپ روشن. در این شکل تنها بخش مرئی طیف نشان داده شده است که گسترهٔ طول‌موج آن از حدود $400\,nm$ (نور بنفش) تا حدود $750\,nm$ (نور قرمز) است.

به‌فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را دربارهٔ نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به‌دست می‌دهند. دو نمونهٔ آشنا از گازهای کم‌فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد. شکل ۴ـ۵ قسمت‌های مرئی طیف‌های خطی این دو گاز را نشان می‌دهد. طول موج‌های مرئی خاصی که اتم‌های این گازها گسیل می‌کنند به تابلوهای نئونی و لامپ‌های جیوه‌ای رنگ‌های مشخصی می‌دهند.



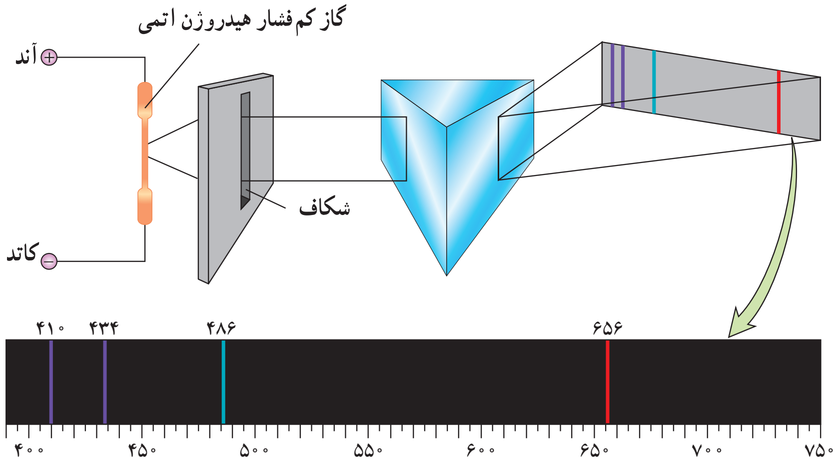
شکل ۴ـ۵ طیف‌های گسیلی خطی برای نئون و جیوه

برای تشکیل طیف گسیلی خطی اتم‌های هر گاز نظیر هیدروژن، هلیم، جیوه، سدیم و نئون معمولاً از یک لامپ باریک و بلند شیشه‌ای که حاوی مقداری گاز رقیق و کم‌فشار است استفاده می‌شود. دو الکترود به نام‌های آند و کاتد در دو طرف این لامپ قرار دارد که به‌ترتیب به پایانه‌های مثبت و منفی یک منبع تغذیه با ولتاژ بالا وصل‌اند. این ولتاژ بالا، سبب تخلیهٔ الکتریکی در گاز می‌شود و اتم‌های گاز درون لامپ شروع به گسیل نور می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که طیف خطی ایجادشده و همچنین رنگ نور گسیل‌شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. در میان طیف گسیلی گازهای مختلف، طیف خطی هیدروژن اتمی هم از جنبهٔ تاریخی و هم از جنبهٔ نظری اهمیت خاصی دارد. طیف خطی این گاز در ناحیهٔ مرئی، شامل یک رشتهٔ منظم از خط‌هایی است که محل آنها در شکل ۴ـ۶ نشان داده شده است. در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضی‌دان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته‌شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به‌دست می‌داد. این رابطه عبارت است از :

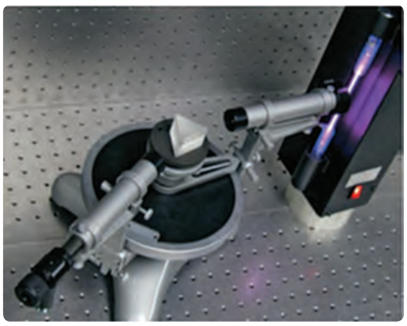
$$\lambda = (364/56\,\mathrm{nm})\frac{n^{2}}{n^{2}-2^{2}} \qquad \text{(معادلهٔ بالمر)} \qquad (۴ـ۲)$$



ژاکوب بالمر (۱۸۹۸-۱۸۲۵ م.)
ریاضی‌دان و فیزیک‌دان سوئیسی، در سال ۱۸۴۹ دورهٔ دکتری خود را در حوزهٔ ریاضیات در دانشگاه بازل به پایان رساند. وی پس از پایان تحصیلات، در یک مدرسهٔ دخترانه و همچنین دانشگاه بازل مشغول به تدریس شد. مشهورترین کار بالمر در خصوص مطالعهٔ طیف اتمی گازها بود، به‌طوری که وی در سال ۱۸۸۵ و در سن ۶۰ سالگی موفق شد رابطه‌ای تجربی برای طیف گسیلی خطی اتم‌های هیدروژن ارائهٔ دهد. این رابطه امروزه به‌نام وی معروف است. بالمر برای ارائهٔ این رابطه از داده‌های آنگستروم، فیزیک‌دان سوئدی، در خصوص اندازه‌گیری طول موج‌های طیف خطی هیدروژن اتمی در ناحیهٔ مرئی بهره گرفت.



(الف)



(ب)

شکل ۴ـ۶ الف) به کمک منشور، طول موج‌های گسیلی از گاز، از یکدیگر جدا و طیف خطی آن تشکیل شده است. ب) اسباب آزمایش تشکیل و مشاهدهٔ طیف گسیلی گازها

که در آن $n \geq ۳$ و همواره عددی صحیح است. با قرار دادن $n=۳,۴,۵,۶$ در معادلهٔ بالمر، طول‌موج خط‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیهٔ مرئی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید :

(خط قرمز) $n=۳ \rightarrow \lambda_۱=۶۵۶/۲۰\,\text{nm}$ (خط آبی) $n=۴ \rightarrow \lambda_۲=۴۸۶/۰۸\,\text{nm}$

(خط نیلی) $n=۵ \rightarrow \lambda_۳=۴۳۴/۰۰\,\text{nm}$ (خط بنفش) $n=۶ \rightarrow \lambda_۴=۴۱۰/۱۳\,\text{nm}$

بالمر با تأمل بیشتر روی رابطهٔ ۴ــ۲، پیشنهاد کرد که ممکن است رشته‌های دیگری از خط‌هایی که تا آن زمان در طیف هیدروژن دیده نشده‌اند وجود داشته باشند. ریدبرگ، فیزیک‌دان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کامل‌تر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادلهٔ بالمر را به‌صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد :

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{n'^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right) \qquad n>n' \qquad \text{(معادلهٔ ریدبرگ)} \qquad (۴\text{ــ}۳)$$

که در آن R ثابت ریدبرگ و مقدار آن برابر $۰/۰۱۰۹۷۳۷۳۱\,(\text{nm})^{-۱}$ است و برای سادگی در محاسبه‌ها، مقدار آن را می‌توان $۰/۰۱۱\,(\text{nm})^{-۱}$ در نظر گرفت. همچنین n' عدد صحیح مثبتی است که به‌ازای $n'=۲$ رابطهٔ ۴ــ۲ مربوط به رشتهٔ بالمر به‌دست می‌آید که در ناحیهٔ مرئی طیف قرار دارد.

چندین سال پس از درگذشت بالمر و با اصلاح ابزارها و روش‌های طیف‌سنجی، امکان کشف گسترهٔ طول‌موج‌های دیگری در طیف گسیلی گاز هیدروژن به‌وجود آمد و مشخص شد که به‌جز رشتهٔ بالمر رشته‌های دیگری در طیف گاز هیدروژن اتمی وجود دارد[۱]. در جدول ۴ــ۱ نام این رشته‌ها، که به‌ازای مقادیر متفاوت n' آمده‌اند درج شده است.



یوهانس رابرت ریدبرگ (۱۹۱۹-۱۸۵۴ م.)

فیزیک‌دان و متخصص طیف‌سنجی، در سوئد به‌دنیا آمد. هنگامی که ۴ساله بود پدرش از دنیا رفت و خانوادهٔ وی مجبور شدند با درآمد اندکی زندگی خود را سپری کنند. در سال ۱۸۷۳ دورهٔ دبیرستان را با نمرات ممتاز در فیزیک و ریاضی به پایان رسانید و در همان سال در دانشگاه لاند ثبت نام کرد. وی در سال ۱۸۷۹ دورهٔ دکترای خود را به پایان رساند. پس از آن به تدریس ریاضیات و فیزیک مشغول شد و در همین دوران بود که به مطالعهٔ وزن استاندارد اتمی عناصر در جدول تناوبی مندلیف پرداخت.

کار بعدی وی پژوهش دربارهٔ طیف اتمی گازها بود که به ارائهٔ رابطه‌ای برای اصلاح معادلهٔ تجربی بالمر در خصوص طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی منجر شد. این رابطه امروزه به نام وی شناخته می‌شود.

ریدبرگ در سال ۱۹۱۳ شدیداً بیمار شد و پس از یک دورهٔ طولانی بیماری، در سال ۱۹۱۹ درگذشت.

جدول ۴ــ۱ رشتهٔ خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطهٔ ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیهٔ طیف
لیمان	۱۹۱۴ــ۱۹۰۶	۱	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۱^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right)$	۲,۳,۴,...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۲^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right)$	۳,۴,۵,...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۳^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right)$	۴,۵,۶,...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۴^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right)$	۵,۶,۷,...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۵^{۲}}-\frac{۱}{n^{۲}}\right)$	۶,۷,۸,...	فروسرخ

۱ــ زمانی که مدل اتمی بور در سال ۱۹۱۳ میلادی مطرح شد، خط‌های گسیلی برای گاز هیدروژن اتمی فقط در رشتهٔ بالمر، رشتهٔ پاشن و تعدادی از خط‌های رشتهٔ لیمان به‌طور قطعی معلوم شده بودند. این مدل که با پیش‌بینی بالمر توافق خوبی داشت منجر به پژوهش‌هایی برای یافتن این رشته‌ها شد، به طوری که سرانجام خط‌های رشته‌های براکت و پفوند و همچنین خط‌های باقی‌ماندهٔ رشتهٔ لیمان به‌تدریج کشف شدند.

مثال ۴ــ۲

طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ براکت ($n'=۴$) را به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع‌اند[1].

پاسخ : در رشتهٔ براکت ($n'=۴$) و برای اولین و دومین خط طیفی به‌ترتیب $n=۵$ و $n=۶$ است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۳ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۴^۲}-\frac{۱}{۵^۲}\right)=R(۲/۲۵\times۱۰^{-۲})\Rightarrow\lambda=۴۰۷۷\text{nm}$$

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۴^۲}-\frac{۱}{۶^۲}\right)=R(۳/۴۷۲\times۱۰^{-۲})\Rightarrow\lambda=۲۶۴۲\text{nm}$$

با مراجعه به طیف موج‌های الکترومغناطیسی در فصل ۳، مشاهده می‌کنیم که این خط‌های طیفی در ناحیهٔ فروسرخ قرار دارند.

مثال ۴ــ۳

کوتاه‌ترین و بلندترین طول موج در رشتهٔ پفوند ($n'=۵$) هیدروژن اتمی را به‌دست آورید.

پاسخ : کوتاه‌ترین طول موج، با $n=\infty$ متناظر است. در این صورت با استفاده از رابطهٔ ۴ــ۳ داریم :

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۵^۲}-\frac{۱}{\infty}\right)=\frac{R}{۲۵}\Rightarrow\lambda=۲۲۷۳\text{nm}$$

همچنین بلندترین طول موج این رشته، متناظر با $n=۶$ است. در این صورت داریم :

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۵^۲}-\frac{۱}{۶^۲}\right)=\frac{۱۱R}{۹۰۰}\Rightarrow\lambda=۷۴۳۸\text{nm}$$

تمرین ۴ــ۲

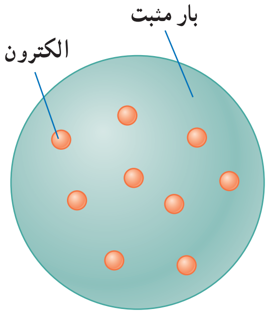
طول موج‌های اولین و دومین خط‌های طیفی اتم هیدروژن در رشتهٔ پاشن ($n'=۳$) را به‌دست آورید و تعیین کنید که این خط‌ها در کدام گسترهٔ طول موج‌های الکترومغناطیسی واقع‌اند.

معادلهٔ ریدبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به‌دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج‌های معیّنی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیک‌دان دانمارکی (۱۹۶۲ــ۱۸۸۵ م.) با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسستهٔ تابش‌شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش‌شده را به مقدارهای معیّنی محدود می‌کند.

۱ــ مشابه این مثال و مثال‌های دیگر، باید مقدار n' مربوط به هر رشته هنگام ارزشیابی داده شود و لازم نیست دانش‌آموزان n' مربوط به رشته‌های مختلف را حفظ کنند.

۴ـ۳ مدل اتم رادرفورد ــ بور

جوزف تامسون فیزیک‌دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنا بر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به‌طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمشی هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند (شکل ۴ــ۷).



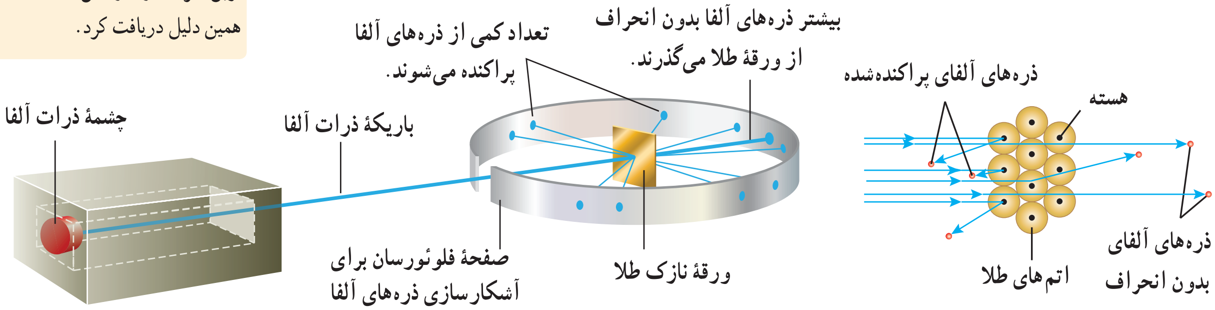
شکل ۴ــ۷ در مدل تامسون، بار الکتریکی مثبت به‌طور همگن در کره‌ای توزیع شده است و الکترون‌ها مانند کشمش‌های کیک در نقاط مختلف آن قرار دارند.



جوزف تامسون (۱۹۴۰ــ۱۸۵۶ م.)
یکی از فیزیک‌دانان بزرگ انگلیسی و استاد دانشگاه کمبریج بود. تامسون پس از کشف الکترون، مدیر آزمایشگاه کاوندیش شد؛ جایی که یکی از شاگردانش در آنجا ارنست رادرفورد بود. تامسون پس از چندین سال کار روی مدل اتمی، که برخی از ویژگی‌های شناخته‌شدهٔ اتم از جمله اندازهٔ شعاع، جرم و خنثایی الکتریکی اتم را شامل می‌شد، مدلی موسوم به کیک کشمشی را در اوایل قرن بیستم ارائه داد که برای چندین سال مورد پذیرش عموم دانشمندان قرار گرفت. تامسون همچنین روی ویژگی‌های رسانش الکتریکی گازها نیز کار می‌کرد و جایزهٔ نوبل فیزیک را در سال ۱۹۰۶ میلادی به همین دلیل دریافت کرد.

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معیّنی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل‌شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.

وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هستهٔ اتم هلیم که به آن ذرهٔ آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند (شکل ۴ــ۸). رادرفورد بنابر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره‌های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقهٔ طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقهٔ طلا می‌گذشتند و در برخورد با صفحهٔ فلوئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقهٔ نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و بر اساس مدل تامسون و شناختی که از باریکهٔ ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلولهٔ توپی را به ورقهٔ نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلولهٔ توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.» این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشد؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشد، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به‌طور آشکار مغایرت داشت.



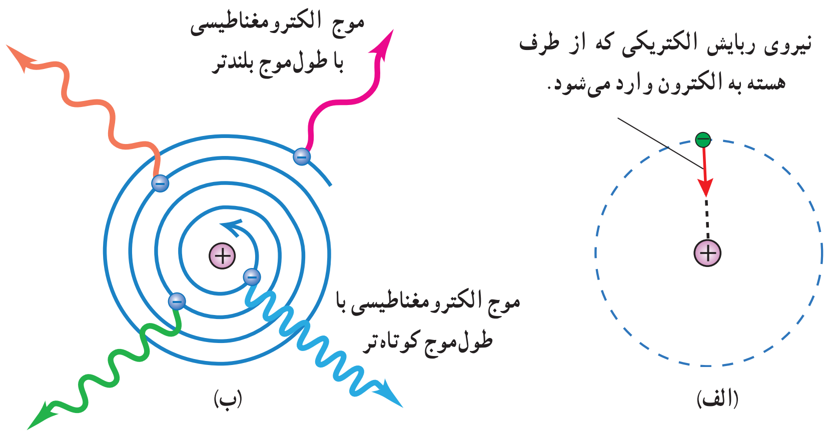
شکل ۴ــ۸ آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقهٔ نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.



ارنست رادرفورد (۱۹۳۷ــ۱۸۷۱ م.)
در نیوزلند متولد شد و بیشتر تحصیلات خود را در همان‌جا به انجام رساند. در ۲۴سالگی به کمبریج رفت و کار خود را در آزمایشگاه کاوندیش زیر نظر تامسون آغاز کرد. سپس به دانشگاهی در کانادا رفت و پس از بازگشت وارد دانشگاه منچستر شد. رادرفورد در آزمایش‌هایی که به کمک پرتوهای آلفا انجام داد ضمن کشف هسته در مرکز اتم، آرایش کلی الکترون‌ها را در اتم مشخص کرد ولی نتوانست جزئیات حرکت آنها را تبیین کند. رادرفورد همچنین با تبدیل عناصر بر اثر واپاشی پرتوزا، فیزیک هسته‌ای را بنیانگذاری و اولین واکنش هسته‌ای مصنوعی را ایجاد کرد. وی در سال ۱۹۰۸ موفق به دریافت جایزهٔ نوبل شیمی شد. رادرفورد در سال ۱۹۱۱ در آزمایش‌هایی که در آنها نیتروژن با ذرات آلفا بمباران می‌شد با ذرات باردار مثبتی روبه‌رو شد و آن را به‌عنوان هستهٔ هیدروژن شناسایی کرد. تا سال ۱۹۲۰، او به این نتیجه رسیده بود که این ذره، باید ذره‌ای بنیادی باشد و با توجه به این که واژهٔ poroton در زبان یونانی به معنای نخستین است، آن را پروتون نامید تا موقعیت اولیهٔ درخور اهمیت آن را در میان هسته‌های اتمی عناصر نشان دهد.

بنا بر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هستهٔ بسیار چگال و کوچک ($\approx 10^{-15}m$ شعاع) و با بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به‌نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست مساوی مجموع بار منفی الکترون‌هایی است که هسته را دربرگرفته‌اند. مدل اتمی رادرفورد که آن را **مدل اتم هسته‌ای** یا **مدل هسته‌ای اتم** می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود، ولی با چالش‌های تازه‌ای نیز مواجه شد. این چالش‌ها برای خود رادرفورد نیز مطرح شده بود، ولی به‌طور صریح می‌گفت که : « نباید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد.»

اگر الکترون‌ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل ۴ــ۹ الف، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور درنمی‌آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که بسامد آن، با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به‌تدریج کوچک‌تر و بسامد حرکت آن به‌تدریج بیشتر شود. این افزایش تدریجی بسامد حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به‌تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل‌شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل پی‌درپی امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد (شکل ۴ــ۹ ب). این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل‌شده توسط اتم‌ها نیز جور درنمی‌آید.

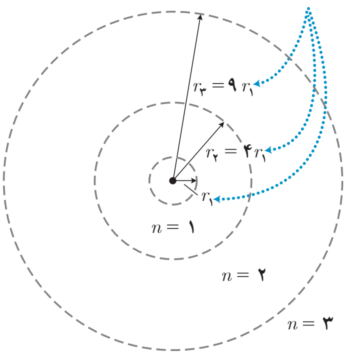


شکل ۴ــ۹ ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند.
ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طیفی پیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.

در سال ۱۹۱۳ میلادی، بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد. این مدل افزون بر آنکه مسئلهٔ ناپایداری اتم را در مدل رادرفورد حل می‌کرد معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را نیز نتیجه می‌داد. نظریهٔ بور با مدل اتم هسته‌ای رادرفورد، شروع می‌شد. بور با این پیشنهاد که «در مقیاس اتمی، قوانین مکانیک کلاسیک و الکترومغناطیس باید توسط قوانین دیگری جایگزین یا تکمیل شود» گامی بزرگ و جسورانه برای رفع مشکلات مدل رادرفورد برداشت. در ادامه با برخی از اصول و مفروضات مدل بور آشنا می‌شویم.

۱ــ مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانتیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسستهٔ معیّنی مجاز هستند.

شعاع مدارها با n^2 متناسب است.



شکل ۴ــ۱۰ اولین مدار بور در اتم هیدروژن دارای انرژی E_1 است. مدارهای دوم و سوم بور به‌ترتیب دارای انرژی‌های $E_2=E_1/4$ و $E_3=E_1/9$ هستند.

بور پس از محاسبات نسبتاً ساده‌ای نشان داد که شعاع این مدارها و انرژی الکترون برای اتم هیدروژن از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

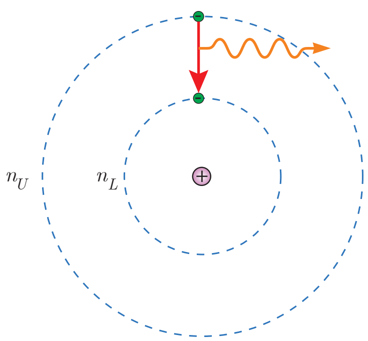
$$r_n = a_0 n^2 \quad \text{(شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن)} \quad (۴ــ۴)$$

$$E_n = \frac{-13/6\,\text{eV}}{n^2} \quad \text{(ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن)} \quad (۴ــ۵)$$

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود ($n = 1,2,3,\ldots$) که مدار الکترون را دور هسته مشخص می‌کند. همچنین a_0 شعاع کوچک‌ترین مدار در اتم هیدروژن (به‌ازای $n = 1$) و مقدار آن برابر $a_0 = r_1 = 5/29\times10^{-11}\text{m}$ است. این مقدار خاص، شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. همچنین انرژی الکترون در $n = 1$ برابر $E_1= -13/6\text{eV}$ است که اندازهٔ آن را معمولاً یک ریدبرگ می‌نامند و با نماد E_R نشان می‌دهند ($E_R = 13/6\text{eV}$). شکل ۴ــ۱۰ سه مدار اول بور را برای اتم هیدروژن نشان می‌دهد.

۲ــ وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این‌رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

فوتون گسیل‌شده



شکل ۴ــ۱۱ بنا به مدل بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

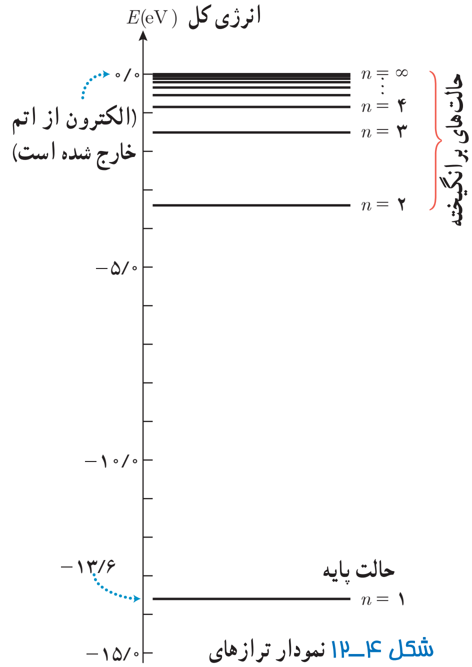
۳ــ الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L، یک فوتون تابش می‌شود[1] (شکل ۴ــ۱۱). در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

$$E_U - E_L = hf \quad \text{(معادلهٔ گسیل فوتون از اتم)} \quad (۴ــ۶)$$

۱ــ زیرنویس U از سرحرف واژهٔ Up به معنای بالا و زیرنویس L از سرحرف واژهٔ Low به معنای پایین گرفته شده است.

نمودار ترازهای انرژی الکترون برای اتم هیدروژن : مفید است که مقدارهای انرژی داده‌شده در معادلهٔ ۴ــ۵ را مانند شکل ۴ــ۱۲ روی نمودار تراز انرژی نمایش دهیم. در این نمودار، که برای اتم هیدروژن رسم شده است بالاترین تراز انرژی به $n=\infty$ در معادلهٔ ۴ــ۵ مربوط است و دارای انرژی ۰eV است. برعکس، پایین‌ترین تراز انرژی مربوط به $n=1$ است و دارای مقدار ۱۳/۶eV− است. پایین‌ترین تراز انرژی، **حالت پایه** نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که **حالت‌های برانگیخته** نامیده می‌شوند متمایز باشد. توجه کنید که با افزایش n چگونه انرژی‌های حالت‌های برانگیخته به هم نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند.

در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. برای بالا بردن الکترون از حالت پایه ($n=1$) به بالاترین حالت برانگیختهٔ ممکن ($n=\infty$) مقدار ۱۳/۶eV انرژی باید صرف شود. صرف این مقدار انرژی، الکترون را از اتم خارج می‌کند و یون مثبت هیدروژن H^+ ایجاد می‌شود. این کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، **انرژی یونش الکترون** نامیده می‌شود. مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل بور برای انرژی یونش اتم هیدروژن، توافق بسیار خوبی با مقدار تجربی دارد.



شکل ۴ــ۱۲ نمودار ترازهای انرژی برای الکترون اتم هیدروژن

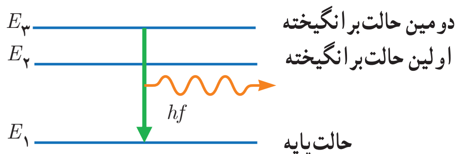
مثال ۴ــ۴

الکترونی در دومین حالت برانگیختهٔ اتم هیدروژن قرار دارد. الف) انرژی الکترون را در این حالت پیدا کنید. ب) وقتی الکترون از این حالت برانگیخته به حالت پایه جهش می‌کند نمودار تراز انرژی آن را رسم کنید. پ) طول موج فوتون گسیل‌شده را حساب کنید.

پاسخ : الف) در دومین حالت برانگیخته، عدد کوانتومی $n=3$ است. به این ترتیب از رابطهٔ ۴ــ۵ داریم :

$$E_3=\frac{-13/6\,eV}{3^2}=-1/51\,eV$$

ب) شکل مقابل نمودار ترازهای انرژی را برای الکترون اتم هیدروژن نشان می‌دهد که با گسیل فوتون، از دومین حالت برانگیخته به حالت پایه جهش کرده است.



پ) انرژی الکترون در حالت پایه $E_1=-13/6\,eV$ است. به این ترتیب انرژی فوتون گسیل‌شده برابر E_3-E_1 است. از رابطهٔ ۴ــ۶ داریم :

$$E_3-E_1=hf=\frac{hc}{\lambda}\Rightarrow\lambda=\frac{hc}{E_3-E_1}=\frac{1240\,eV.nm}{-1/5\,eV-(-13/6\,eV)}=102\,nm$$

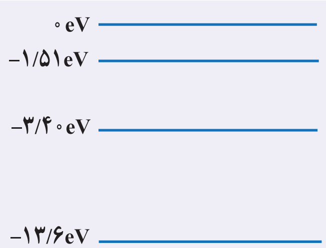
تمرین ۴ــ۳

شکل مقابل تعدادی از ترازهای انرژی اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

الف) کمترین طول‌موج فوتونی را پیدا کنید که با گذار بین این ترازها به‌دست می‌آید.

ب) اگر الکترون از تراز انرژی ۱/۵۱eV− به تراز پایه جهش کند طول‌موج فوتون گسیلی را پیدا کنید.

پ) کدام گذار بین دو تراز می‌تواند به گسیل فوتونی با طول‌موج ۶۶۰nm منجر شود؟ توجه کنید که این طول‌موج‌ها در گستره مرئی است.



استخراج معادلهٔ ریدبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور : همان‌طور که در ابتدای این بخش نیز اشاره کردیم یکی از موفقیت‌های مدل بور نتیجه‌گیری معادلهٔ ریدبرگ برای طیف خطی گاز هیدروژن اتمی است. برای بررسی بیشتر این موضوع فرض کنید الکترون اتم هیدروژن در یکی از حالت‌های برانگیخته باشد و بخواهد به حالتی با انرژی کمتر جهش کند. به عبارت دیگر الکترون از مدار مانای n_U به مدار مانای n_L می‌رود و فوتونی را گسیل می‌کند. با توجه به روابط ۴ـ۵ و ۴ـ۶، بسامد فوتون گسیل‌شده برابر است با :

$$f=\frac{۱}{h}(E_U-E_L)=\frac{E_R}{h}\left(\frac{۱}{n_L^{۲}}-\frac{۱}{n_U^{۲}}\right)$$

با استفاده از رابطهٔ $f=c/\lambda$ طول‌موج فوتون گسیل‌شده را پیدا می‌کنیم.

$$\frac{c}{\lambda}=\frac{E_R}{h}\left(\frac{۱}{n_L^{۲}}-\frac{۱}{n_U^{۲}}\right)\Rightarrow\frac{۱}{\lambda}=\frac{E_R}{hc}\left(\frac{۱}{n_L^{۲}}-\frac{۱}{n_U^{۲}}\right)$$

از سوی دیگر داریم :

$$\frac{E_R}{hc}=\frac{۱۳/۶\,\text{eV}}{۱۲۴۰\,\text{eV.nm}}=۰/۰۱۰۹(\text{nm})^{-۱}$$

که این مقدار، با تقریب بسیار خوبی همان ثابت ریدبرگ R است که پیش از این با آن آشنا شدیم.

به این ترتیب داریم :

$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{n_L^{۲}}-\frac{۱}{n_U^{۲}}\right)$$

این رابطه همان معادلهٔ ۴ـ۳ است که با اصلاح و بازنویسی معادلهٔ بالمر برای طیف گسیلی خطی هیدروژن توسط ریدبرگ به‌دست آمد. در نتیجه به کمک مدل بور می‌توانیم رابطهٔ تجربی ریدبرگ را به‌دست آوریم و طیف خطی هیدروژن اتمی را توجیه کنیم. وقتی الکترون برای مثال از مدار $n_U=۳$ به مدار $n_L=۲$ می رود، طول‌موج فوتون گسیل‌شده برابر است با :

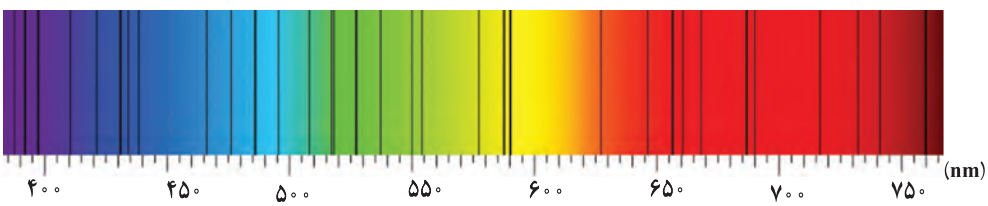
$$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{n_L^{۲}}-\frac{۱}{n_U^{۲}}\right)=۰/۰۱۰۹(\text{nm})^{-۱}\left(\frac{۱}{۲^{۲}}-\frac{۱}{۳^{۲}}\right)\Rightarrow\lambda=۶۶۰\text{nm}$$

مقدار به‌دست آمده به نحو چشمگیری به طول‌موج خط قرمز در رشتهٔ بالمر که از تجربه حاصل شده، نزدیک است.

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور : در سال ۱۸۱۴ میلادی فرانهوفر، با مشاهدهٔ دقیق طیف خورشید، خط‌های تاریک نازکی را در آن کشف کرد[۱] (شکل ۴ـ۱۳). این تجربه نشان می‌داد در تابشی که از خورشید گسیل می‌شود و به زمین می‌رسد بعضی از طول‌موج‌ها وجود ندارند. امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانهوفر در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول‌موج‌های مربوط به این خط‌ها توسط گازهای جو خورشید است. خط‌های دیگر به سبب جذب نور در گازهای جو زمین پدید می‌آیند.



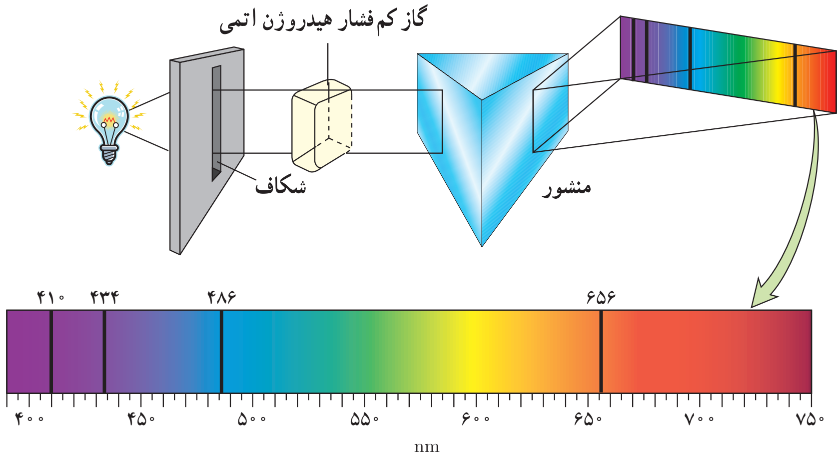
نیلز بور (۱۹۶۲ـ۱۸۸۵ م.) در کپنهاگ دانمارک به دنیا آمد و در همان‌جا به تحصیلات خود ادامه داد. بور در سال ۱۹۱۱ دکترای فیزیک خود را از دانشگاه کپنهاگ دریافت کرد. وی در سال ۱۹۱۲ میلادی پس از مدتی کار با تامسون، از کمبریج به منچستر رفت و در آزمایشگاه رادرفورد که مرکزی پژوهشی دربارهٔ مواد پرتوزا و ساختار اتم بود مشغول به‌کار شد. در آنجا بود که مدل اتمی خود را در خصوص اتم هیدروژن تدوین و ارائه کرد. پس از آن در توسعهٔ نظریه مکانیک کوانتومی نقش عمده‌ای داشت. بور در سال ۱۹۲۲ جایزهٔ نوبل فیزیک را برای درک ساختار اتمی و نظریهٔ کوانتومی دریافت کرد. مؤسسهٔ فیزیک نظری که وی در سال ۱۹۲۱ میلادی در کپنهاگ بنیان نهاد نزدیک به یک سده است که دانشمندان را از سراسر جهان به سوی خود جذب می‌کند.



شکل ۴ـ۱۳ خط‌های تاریکی که در طیف خورشید دیده می‌شود، به افتخار کشف‌کنندهٔ آن، خط‌های فرانهوفر نامیده می‌شوند.

۱ـ از ویلیام وُلاستون به‌عنوان نخستین کاشف این خط‌های تاریک نام می‌برند، ولی جوزف فرانهوفر بود که این خط‌ها را به تفصیل مورد مطالعه قرار داد.

شکل ۴ــ۱۴ اسباب آزمایشی را به‌صورت طرح‌وار نشان می‌دهد که در آن باریکهٔ نور سفید قبل از عبور از منشور، از گاز کم‌فشارهیدروژن می‌گذرد. با انجام این آزمایش پی می‌بریم یک طیف پیوسته (مشابه طیف رنگین‌کمان) با خط‌هایی تاریک درون آن مشاهده می‌شود که در آن بعضی از طول‌موج‌ها از نور سفید جذب شده‌اند.



شکل ۴ــ۱۴ روشی برای مشاهدهٔ طیف‌های جذبی. یک چشمهٔ نور سفید که گستره‌ای پیوسته از طول‌موج‌ها را تولید می‌کند، از ظرفی حاوی گاز کم‌فشار هیدروژن اتمی می‌گذرد و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول‌موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

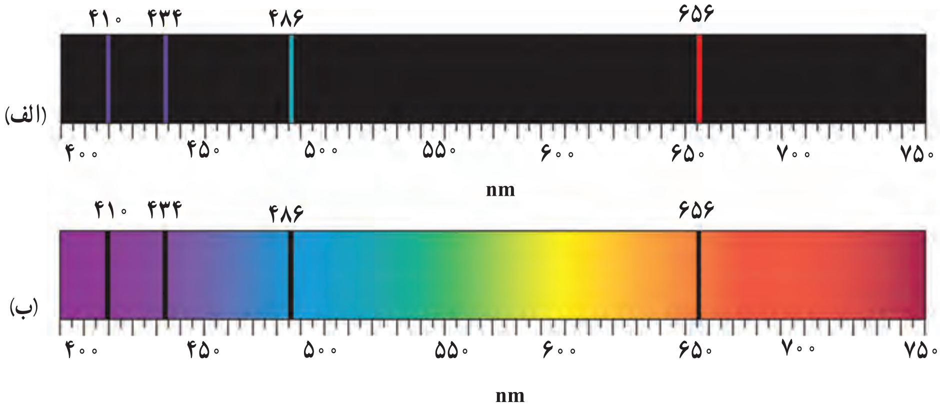


جوزف فرانهوفر (۱۸۲۶ــ۱۷۸۷ م.)

فیزیک‌دان و سازندهٔ ابزارهای نوری، در آلمان به دنیا آمد. وی به‌خاطر کیفیت ابزارهای نوری‌ای که می‌ساخت و همچنین نظریه‌هایش دربارهٔ پراش معروف بود. فرانهوفر پس از آنکه در ۱۱سالگی یتیم شد در یک کارگاه عینک‌سازی مشغول به کار شد. در سال ۱۸۰۱ میلادی سقف کارگاهی که در آن کار می‌کرد فرو ریخت و با خوش اقبالی بسیار، جان سالم به‌در برد. فرانهوفر دستگاه طیف نمایی را اختراع کرد و توری‌های پراش را توسعه داد. او به کمک دستگاه طیف‌نمایی که اختراع کرده بود نخستین بار خط‌های تیره‌ای را در طیف خورشید مشاهده کرد که امروزه به نام خودش به خط‌های فرانهوفر مشهورند.

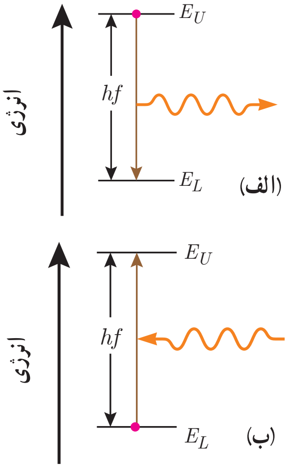
دراواسط قرن نوزدهم، آزمایش‌هایی مشابه آنچه بیان کردیم برای گازهای عناصر مختلف انجام شد. این آزمایش‌ها نشان می‌داد که اگر نور سفید از داخل گاز عنصری عبور کند و سپس طیف آن تشکیل شود، در طیف آن، خط‌های تاریکی ظاهر می‌شود. این خط‌ها (طول‌موج‌ها) توسط اتم‌های گاز عنصر جذب شده‌اند. شکل ۴ــ۱۵، طیف گسیلی و طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد. مطالعه و مقایسهٔ این دو طیف و همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که :

- هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول‌موج‌های معیّنی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول‌موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.



شکل ۴ــ۱۵ طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی. الف) خط‌های روشن در طیف گسیلی معرف طول‌موج‌های گسیل‌شده و ب) خط‌های تاریک در زمینهٔ طیف، معرف طول‌موج‌های جذب‌شده توسط اتم‌های گاز هستند.

اینکه چرا هر عنصر تنها طول‌موج‌های خاصی را که مشخصهٔ آن عنصر است جذب یا گسیل می‌کند چالشی بود که برای چندین دهه فیزیک‌دانان را به خود مشغول کرده بود و تا پیش از ارائهٔ مدل بور، نظریهٔ قابل قبولی برای توضیح آن وجود نداشت. اکنون براساس مدل بور می‌دانیم که خط‌های گوناگون در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی وقتی به‌وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیلی برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند (شکل ۴ــ۱۶ الف). همچنین الکترون‌ها می‌توانند در جهت عکس گذار کنند، یعنی در فرایندی که **جذب فوتون** خوانده می‌شود از ترازهای انرژی پایین‌تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند (شکل ۴ــ۱۶ ب). در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند. به این ترتیب اگر فوتون‌هایی با گسترهٔ پیوسته‌ای از طول‌موج‌ها مطابق آزمایش شکل ۴ــ۱۴ از گاز بگذرند و سپس طیف آنها تشکیل شود، یک دسته خط‌های جذبی تاریک در طیف پیوسته مشاهده خواهند شد. خط‌های تاریک، طول‌موج‌هایی را مشخص می‌کنند که با فرایند جذب فوتون برداشته شده‌اند.



شکل ۴ــ۱۶ الف) فرایند گسیل فوتون و ب) فرایند جذب فوتون توسط اتم

پرسش ۴ــ۱

آیا معادلهٔ ۴ــ۶ برای فرایند جذب فوتون نیز برقرار است؟

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبهٔ انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن‌گونه نیز می‌توان به کار برد. **اتم هیدروژن‌گونه** به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن‌گونه است. مدل بور می‌تواند انرژی یونش و همچنین طول‌موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن‌گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به‌رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

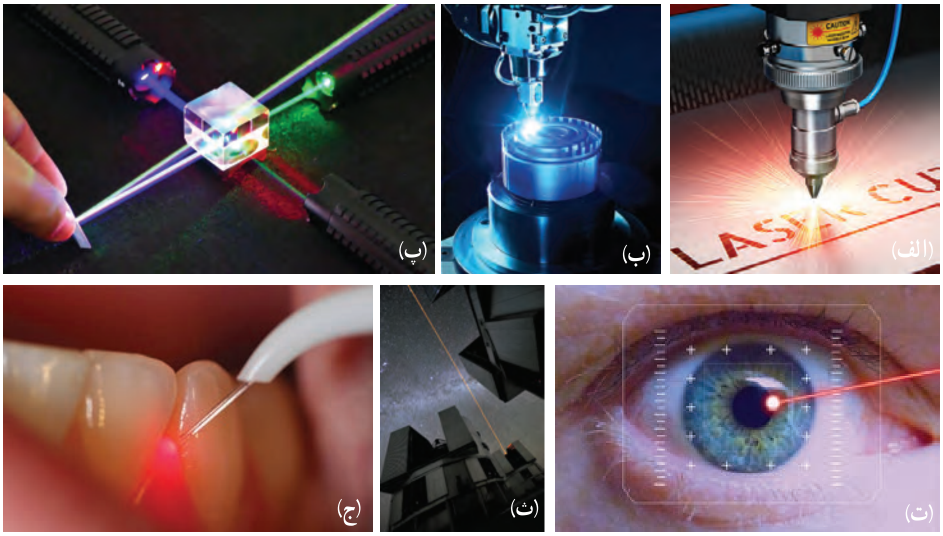


علی جوان (۲۰۱۶ــ۱۹۲۶ م.) از پدر و مادری تبریزی، در تهران به دنیا آمد. از دبیرستان البرز دیپلم گرفت و پس از آن به مدت یک سال در دانشکدهٔ علوم دانشگاه تهران به تحصیل پرداخت. در سال ۱۹۴۸ میلادی به نیویورک رفت و چندین دورهٔ درسی را در دانشگاه کلمبیا گذراند. علی جوان بدون داشتن مدرک لیسانس یا فوق لیسانس، موفق شد در سال ۱۹۵۴ دکترای خود را زیر نظر چارلز تاونز، فیزیک‌دان و مخترع بزرگ آمریکایی و برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۶۴، دریافت کند. در سال ۱۹۵۵ دورهٔ پسادکترا را در آزمایشگاه تابش[1] و با تحقیق روی ساعت اتمی دنبال کرد. در سال ۱۹۵۸ به آزمایشگاه‌های تلفن بل[2] پیوست و مدتی بعد در همان‌جا ایدهٔ اولیهٔ لیزرهای گازی را ارائه کرد. وی پس از یک سال تلاش و با همکاری دو فیزیک‌دان دیگر به نام‌های ویلیام بنت و دونالد هریوت، موفق به ساخت اولین نمونهٔ لیزر گازی هلیم نئون در سال ۱۹۶۰ شد.

۱ــ Radiation Laboratory
۲ــ Bell Telephone Laboratories

۴ـ۴ لیزر

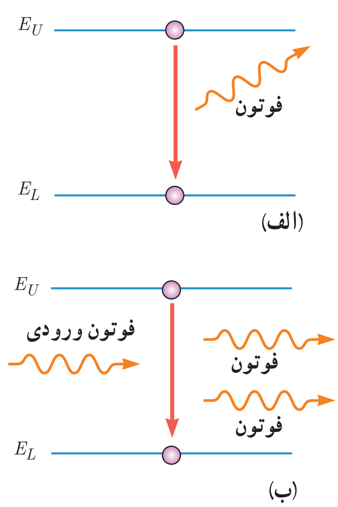
لیزر یکی از مفیدترین اختراع‌های قرن بیستم است که کاربرد زیادی در زندگی، فنّاوری و صنعت دارد. لیزر امروزه در چاپگرها، در نگاشتن اطلاعات روی CD و DVDها و خواندن آنها، شبکه‌های کابل نوری، اندازه‌گیری دقیق طول، دستگاه‌های جوشکاری و برش فلزات، پژوهش‌های علمی، سرگرمی و ... به‌کار می‌رود. همچنین در حرفهٔ پزشکی برای جراحی، برداشتن لکه‌های پوستی، اصلاح دید چشم و دندانپزشکی و ... از لیزر استفاده می‌شود (شکل ۴ـ۱۷).



شکل ۴ـ۱۷ برخی از کاربردهای لیزر : الف) در برشکاری، ب) در جوشکاری، پ) در آزمایش‌های فیزیک و پژوهش‌های علمی، ت) در چشم پزشکی، ث) در نجوم، ج) در دندانپزشکی

نخستین لیزر، موسوم به لیزر یاقوتی، را تئودور مایمن (۲۰۰۷ــ۱۹۲۷ م.) در سال ۱۹۶۰ میلادی ساخت. مدتی پس از آن و در همان سال، علی جوان و همکارانش موفق به ساخت نخستین لیزر گازی هلیم نئون شدند.

مطابق مدل اتمی بور وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به‌صورت گسیل خودبه‌خود و یا گسیل القایی باشد. در گسیل خودبه‌خود (شکل ۴ــ۱۸ الف) فوتون در جهتی کاتوره‌ای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی (شکل ۴ــ۱۸ ب) که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_U - E_L$ یکسان باشد.



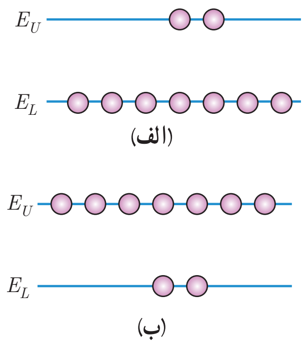
شکل ۴ــ۱۸ الف) گسیل خودبه‌خود ب) گسیل القایی

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد. اول اینکه یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود (شکل ۴ــ۱۸ ب). به این‌ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند[۱]. دوم اینکه فوتون گسیل‌شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. سوم اینکه فوتون گسیل‌شده

۱ــ واژهٔ laser برگرفته از سرواژه‌های عبارت (light amplification by the stimulated emission of radiation) به معنای تقویت نور توسط گسیل القایی تابش است.

با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکهٔ لیزری را ایجاد می‌کنند هم‌بسامد، هم‌جهت و هم‌فاز هستند.

در گسیل القایی یک چشمهٔ انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخشش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به **وارونی جمعیت** معروف است (شکل ۴ـ۱۹).



شکل ۴ـ۱۹ الف) به طور معمول و در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند. ب) در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری (در مقایسه با تراز پایین‌تر) قرار دارند.

وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به **ترازهای شبه‌پایدار**[1] نسبت به تراز پایین‌تر بسیار بیشتر باشند. در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری ($10^{-3}s$) نسبت به حالت برانگیختهٔ معمولی ($10^{-8}s$) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

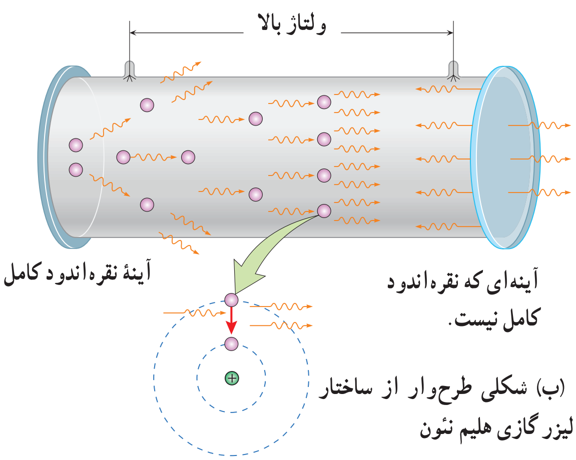
فناوری و کاربرد

لیزر گازی هلیم نئون (He ـ Ne)

شکل الف، یک لیزر هلیم نئون و شکل ب، طرحی ساده از سازوکار ایجاد باریکهٔ لیزر را درون این لیزرها نشان می‌دهد. گاز کم‌فشاری شامل ۱۵٪ هلیم و ۸۵٪ نئون درون لولهٔ شیشه‌ای قرار دارد. برای ایجاد وارونی جمعیت، از تخلیهٔ الکتریکی با ولتاژ بالا درون مخلوط گازی استفاده می‌شود. وقتی یک اتم با گسیل خودبه‌خود، فوتونی موازی با محور لوله گسیل کند، فرایند ایجاد باریکهٔ لیزر شروع می‌شود. این فوتون با گسیل القایی باعث می‌شود تا اتم دیگری دو فوتون موازی با محور لوله گسیل کند. این دو فوتون با گسیل القایی، چهار فوتون ایجاد می‌کنند. از چهار فوتون، هشت فوتون حاصل می‌شود و به همین ترتیب نوعی بهمن فوتونی به‌وجود می‌آید. برای اینکه فوتون‌های بیشتر و بیشتری با گسیل القایی به‌وجود آیند دو انتهای لوله آینه‌هایی قرار می‌دهند تا فوتون‌ها را در داخل مخلوطی از گازهای هلیم و نئون به جلو و عقب بازتاب دهند. از آنجا که یکی از آینه‌ها بازتاب‌دهندهٔ کامل نیست بخشی از فوتون‌ها از لوله خارج می‌شوند و باریکهٔ لیزر را تشکیل دهند. بازده لیزرهای هلیم نئون بسیار کم و در حدود ۰/۰۱ تا ۰/۱ درصد است، ولی به دلیل کیفیت خوب باریکهٔ لیزر ایجادشده، کاربرد زیادی در صنعت و فعالیت‌های علمی و آزمایشگاهی دارند.

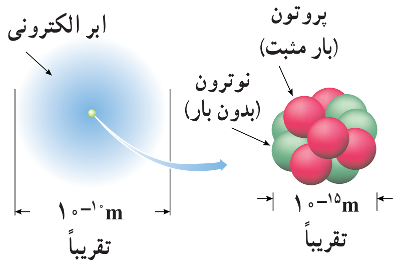


(الف) تصویری از لیزر گازی هلیم نئون



(ب) شکلی طرح‌وار از ساختار لیزر گازی هلیم نئون

1ـ Metastable



شکل ۴ــ۲۰ مقایسهٔ ابعاد اتم و هسته به‌طور تقریبی

۴ــ۵ ساختار هسته

کشف پرتوزایی طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ شعاع اتم است (شکل ۴ــ۲۰).

هستهٔ اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند. نوترون، در سال ۱۹۳۲ میلادی توسط فیزیک‌دان انگلیسی، جیمز چادویک، کشف شد. نوترون بار الکتریکی ندارد، و جرمش اندکی بیشتر از پروتون است (جدول ۴ــ۲). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهندهٔ اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

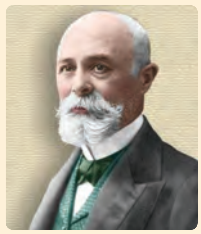
جدول ۴ــ۲ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهندهٔ اتم

ذره	بار الکتریکی (C)	جرم	
		کیلوگرم (kg)	یکای جرم اتمی (u)*
الکترون	$-۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$	$۹/۱۰۹۳۸۹ \times ۱۰^{-۳۱}$	$۵/۴۸۵۸ \times ۱۰^{-۴}$
پروتون	$+۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$	$۱/۶۷۲۶۲۲ \times ۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۷۲۷۶
نوترون	۰	$۱/۶۷۴۹۲۹ \times ۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۸۶۶۴

* در شیمی ۱ دیدید $\frac{۱}{۱۲}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به‌اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر u۱۲/۰۰۰۰۰۰ است.

تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی (Z) می‌نامند و در عنصرهای مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است. تعداد نوترون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود. همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند.

$$\underbrace{A}_{\text{تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها (عدد جرمی)}} = \underbrace{Z}_{\text{تعداد پروتون‌ها (عدد اتمی)}} + \underbrace{N}_{\text{تعداد نوترون‌ها (عدد نوترونی)}} \qquad (۴ــ۷)$$



هانری بکرل (۱۹۰۸ــ۱۸۵۲م.)

فیزیک‌دان فرانسوی در سال ۱۸۹۲ به‌عنوان استاد موزهٔ ملی تاریخ طبیعی پاریس انتخاب شد. وی نخستین دانشمندی است که ــ در سال ۱۸۹۶ و در حالی که مشغول بررسی خاصیت فسفرسانس نمک‌های اورانیم بود ــ پدیدهٔ پرتوزایی را کشف کرد. بکرل در سال ۱۹۰۳، به همراه ماری کوری و پیر کوری جایزهٔ نوبل فیزیک را به‌خاطر کشف پرتوزایی طبیعی دریافت کرد. به افتخار فعالیت‌های وی در زمینهٔ پرتوزایی، یکای SI برای فعالیت پرتوزایی، بکرل (Bq) نام‌گذاری شده است.

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود[1] :

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}_{N}$$

عدد جرمی ← A
عدد اتمی ← Z
نماد عنصر ← X
عدد نوترونی ← N

مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطهٔ ۴ــ۷ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهندهٔ مقدار Z است. برای مثال، هستهٔ اتم آلومینیم را به‌جای $^{۲۷}_{۱۳}\mathrm{Al}_{۱۴}$ می‌توان به‌صورت $^{۲۷}_{۱۳}\mathrm{Al}$ یا $^{۲۷}\mathrm{Al}$ نمایش داد.

۱ــ در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلوئید (nuclide) می‌نامند.

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون ($^{12}_{6}C$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون ($^{13}_{6}C$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به‌جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۴ــ۳).



جیمز چادویک (۱۹۷۴ــ۱۸۹۱م.)
فیزیک‌دان انگلیسی، پس از طی دورهٔ کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه منچستر، تحقیقاتش را زیر نظر رادرفورد ادامه داد. در سال ۱۹۱۴ برای نخستین بار، طیف پیوستهٔ پرتوهای بتا را که از بعضی عناصر پرتوزا تشکیل می‌شد کشف کرد. اما مهم‌ترین دستاورد چادویک، کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ بود که حاصل مدت طولانی همکاری با رادرفورد بود. چادویک جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۳۵ میلادی را به این منظور دریافت کرد.

جدول ۴ــ۳ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	^{13}C	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ^{2}H)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	^{14}C	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ^{3}H)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	^{235}U	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	^{12}C	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	^{238}U	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

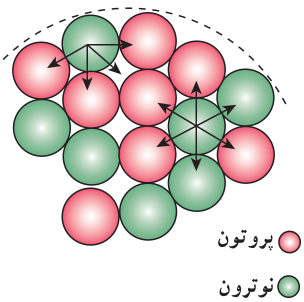
تمرین ۴ــ۴

با توجه به آنچه تاکنون دیدید و همچنین با استفاده از جدول تناوبی عناصر، که در پیوست کتاب آمده است، نماد هسته را در هر یک از موارد زیر تعیین کنید.

الف) ایزوتوپ فلوئور (F) با عدد نوترونی ۱۰

ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

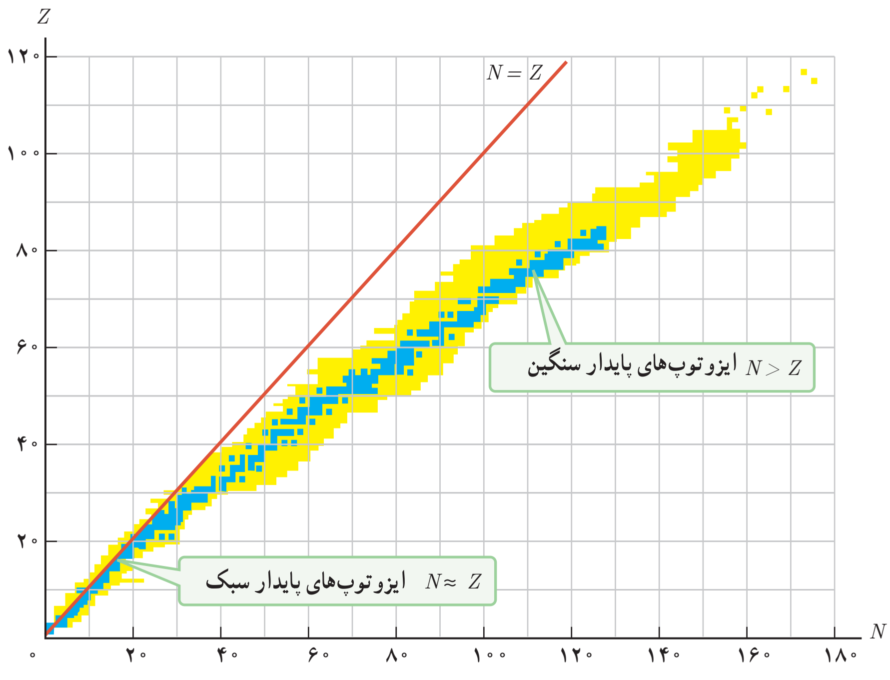
پایداری هسته : همان‌طور که در شکل ۴ــ۲۰ نشان داده شده است ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک‌تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹/۹ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. محاسبه نشان می‌دهد مرتبهٔ بزرگی چگالی هسته $10^{14}\,g/cm^3$ است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب $1\,g/cm^3$ است). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که به اندازهٔ نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون‌های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، توجه کنیم. در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می‌شود؟ با توجه به پایداری بسیاری از هسته‌هایی که در طبیعت وجود دارند روشن است که نوعی نیروی جاذبه باید اجزای هسته را کنار هم نگه دارد. از طرفی، جاذبهٔ حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلئون‌ها، چنان ضعیف است که نمی‌تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. این موضوع وجود نیروی جدیدی بین نوکلئون‌ها را مطرح کرد که به آن نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.



شکل ۴ــ۲۱ قسمتی از هسته و نوکلئون‌های آن که به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. هر نوکلئون، فقط به نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.

نیروی هسته‌ای، کوتاه‌بُرد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند (شکل ۲۱ــ۴). افزون بر این، نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی ربایشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به‌همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام‌گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

برای پایداری هسته، باید نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبهٔ بین نوکلئون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلندبُرد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاور خود را با نیروی هسته‌ای جذب می‌کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون‌های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوترون‌های درون هسته نیز افزایش یابد. شکل ۴ــ۲۲ نموداری از Z برحسب N را برای عنصرهای مختلف نشان می‌دهد. هستهٔ پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z=۸۳$)، متعلق به بیسموت ($^{۲۰۹}_{۸۳}Bi$) است. درمیان عناصر ناپایدار با عدد اتمی $Z>۸۳$، توریم ($Z=۹۰$) و اورانیم ($Z=۹۲$) تنها عنصرهایی‌اند که واپاشی آنها چنان کُند است که از هنگام تشکیل منظومهٔ شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپاشی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.



شکل ۴ــ۲۲ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته‌های پایدار و پرتوزا. هر نقطهٔ آبی رنگ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. نقاط زردرنگ هسته‌های پرتوزای شناخته شده را نشان می‌دهند.

پرسش ۴ــ۲

هر نقطهٔ آبی رنگ در نمودار شکل ۴ــ۲۲ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.

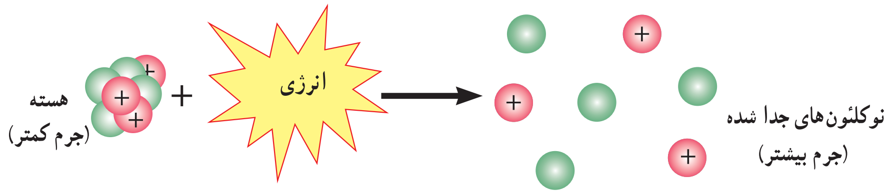
الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید.

ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود. شکل ۴ــ۲۳ این موضوع را به‌طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطهٔ معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به‌دست می‌آید[1]. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 که عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است[2].

توجه : انرژی بستگی هسته‌ای، انرژی‌ای نیست که در هسته وجود داشته باشد، بلکه این انرژی معادل با اختلاف انرژی جرمی میان هسته و نوکلئون‌های مجزای آن است. اگر در عمل می‌توانستیم یک هسته را به نوکلئون‌های آن جدا کنیم، در این فرایند جداسازی، باید این انرژی به نوکلئون‌های سازندهٔ هسته انتقال می‌یافت.



شکل ۴ــ۲۳ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن تقسیم شود.

انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلئون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هستهٔ برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هستهٔ برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ به‌صورت ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}^*$ مشخص می‌کنند. نکتهٔ قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلئون‌ها در هسته از مرتبهٔ keV تا مرتبهٔ MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبهٔ eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۴ــ۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

همان‌طور که در مقدمهٔ فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. وقتی یک هستهٔ ناپایدار یا پرتوزا به‌طور طبیعی (یا اصطلاحاً خودبه‌خود) واپاشی می‌کند، نوع معیّنی از ذرات یا فوتون‌های پر انرژی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، پرتوزایی طبیعی نامیده می‌شود.

۱ــ با رابطهٔ معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در شیمی (۱) نیز آشنا شدید.

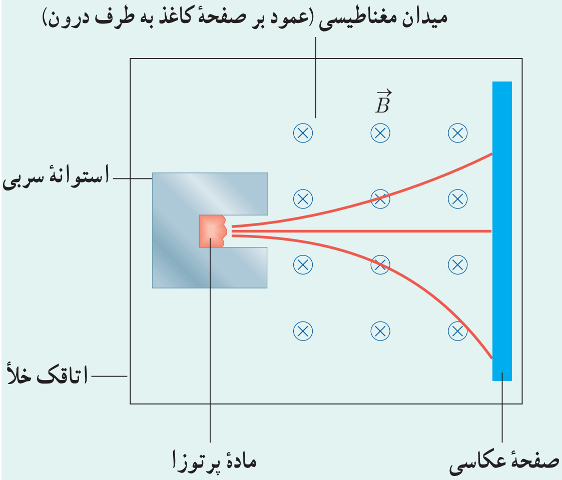
۲ــ آموزش محاسبهٔ انرژی بستگی هسته خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود : پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقهٔ نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx 0/01mm$) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 0/1mm$) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx 100mm$) بگذرند.

در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

پرسش ۴ـ۳

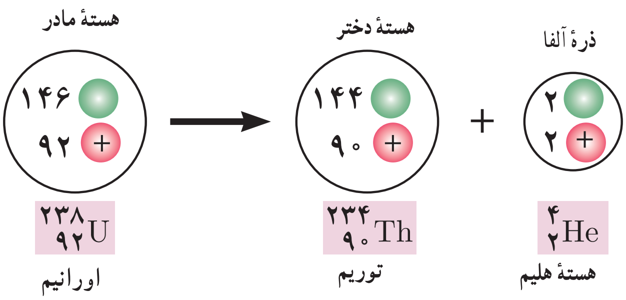
شکل روبه‌رو طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعه‌ای از مادهٔ پرتوزا را در ته حفرهٔ باریکی در یک استوانهٔ سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقکی می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحهٔ عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط قرمزرنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.



واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هستهٔ $^{A}_{Z}X$ با گسیل ذرهٔ آلفا وامی‌پاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهند که پرتوهای α، ذرات باردار مثبت از جنس هستهٔ اتم هلیم ($^{4}_{2}He$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He \qquad (\text{واپاشی } \alpha) \qquad (۴ـ۸)$$

در این رابطه X هستهٔ مادر و Y هستهٔ دختر نامیده می‌شود. شکل ۴ـ۲۴، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴ـ۲۴ در واپاشی α یک هستهٔ مادر ناپایدار، ذرهٔ α گسیل می‌کند و هستهٔ متفاوتی (هستهٔ دختر) به‌وجود می‌آید.



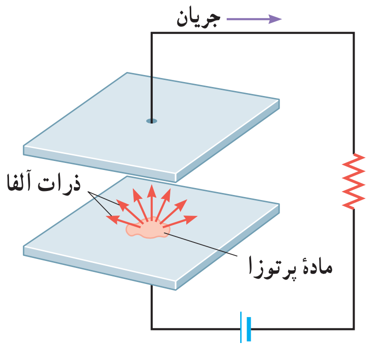
عکسی تاریخی از خانواده‌ای که همهٔ آنها نوبل گرفتند.
ماری کوری (۱۹۳۴ـ۱۸۶۷م.)
پیر کوری (۱۹۰۶ـ۱۸۵۴م.)
ایرن کوری (۱۹۵۶ـ۱۸۹۷م.)

ماری کوری فیزیک‌دان و شیمی‌دان لهستانی‌ـ فرانسوی است که مطالعات پیشگام وی در زمینهٔ پرتوزایی طبیعی رادیُم و سایر عنصرها، دو جایزهٔ نوبل برای وی به همراه داشت : جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ به خاطر کشفِ پرتوزایی طبیعی (به طور مشترک با شوهرش پیر کوری و هانری بکرل) و جایزهٔ نوبل شیمی در سال ۱۹۱۱ به خاطر جدا کردن رادیم خالص. وی پژوهشکدهٔ رادیم را در دانشگاه پاریس تأسیس کرد و در آنجا به پژوهش در زمینهٔ کاربردهای پزشکی مواد پرتوزا پرداخت. دخترش ایرن، جایزهٔ نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ را به خاطر کشف پرتوزایی مصنوعی، یک سال پس از درگذشت مادرش دریافت کرد.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفازا هرگز وارد بدن نشوند.

فنّاوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

یکی از کاربردهای گستردهٔ واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحهٔ کوچک و موازی فلزی در فاصلهٔ حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی مادهٔ پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، مولکول‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی به‌وجود می‌آیند. ولتاژ باتری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحهٔ دیگر منفی باشد، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریانی به‌وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. اُفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشداردهنده‌ای را به‌کار می‌اندازد.



(ب)


(الف)

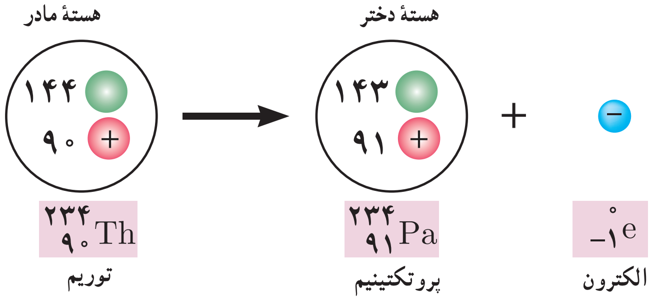
واپاشی β : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوزایی بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هستهٔ مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به‌وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطهٔ زیر بیان می‌کنند :

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^- \qquad (\text{واپاشی } \beta^-) \qquad (۴\text{–}۹)$$



چی اِن ــ شی ئونگ وو (۱۹۹۷ــ۱۹۱۲م.) را از زمرهٔ برجسته‌ترین فیزیک‌دان‌های قرن بیستم می‌دانند که در ۱۹۱۲ در شهری در حوالی شانگهای چین به دنیا آمد. آزمایش‌های پیشگامانه‌ای که در مورد واپاشی بتا و برهم‌کنش‌های هسته‌ای انجام داد، زمینهٔ لازم را برای توسعهٔ مدل‌های جدید فیزیک زیراتمی فراهم کرد. وی نظریهٔ واپاشی بتا را که توسط فرمی ارائه شده بود به‌طور تجربی به تأیید رساند. چی‌اِن ــ شی‌ئونگ اولین زنی بود که در سال ۱۹۷۵ میلادی به سمت رئیس انجمن فیزیک امریکا برگزیده شد. زندگی فوق‌العادهٔ او را با شعری قدیمی به زبان چینی توصیف می‌کنند: «اگرچه راهی طولانی و پر فراز و نشیب در پیش دارم، قاطعانه می‌خواهم تا انتهای آن را بپیمایم.»

شکل ۴ــ۲۵ مثالی از واپاشی β^-، برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴ــ۲۵ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

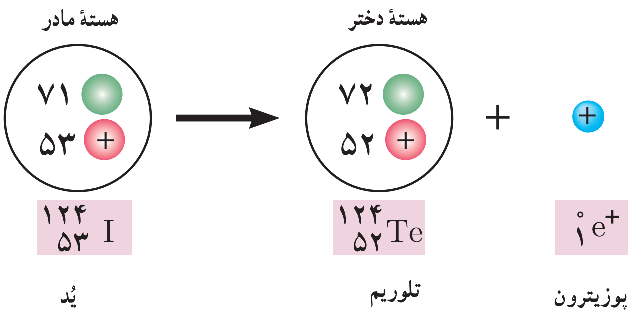
تمرین ۴ــ۵

لوتیتم ($^{176}_{71}Lu$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذرهٔ گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود[1].

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e^+ \qquad (\text{واپاشی } \beta^+) \qquad (۴ــ۱۰)$$

شکل ۴ــ۲۶ مثالی از واپاشی β^+، برای یُد ۱۲۴ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴ــ۲۶ واپاشی β^+ وقتی رخ می‌دهد که پروتونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به‌صورت ذرهٔ β^+ گسیل می‌شود.

۱ــ در واپاشی β^+، ذره‌ای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e^+ + \upsilon$). همچنین در واپاشی β^-، ذره‌ای دیگر به نام پادنوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{A}_{Z}X = {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^- + \bar{\upsilon}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

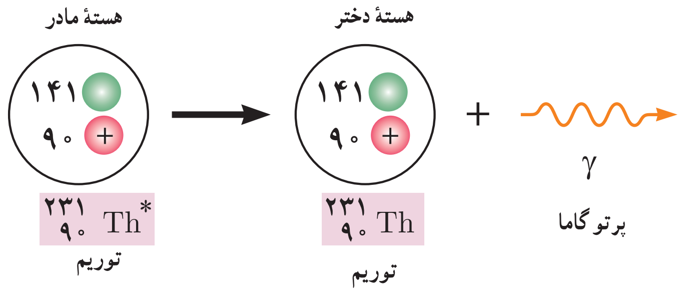
تمرین ۴ـ۶

ایزوتوپ ($^{15}_{8}O$) با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، A و Z تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هستهٔ برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود.

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow ^{A}_{Z}X + \gamma \qquad \text{(واپاشی } \gamma\text{)} \qquad (۴\text{ـ}۱۱)$$

شکل ۴ـ۲۷ مثالی از واپاشی γ، برای توریم ۲۳۱ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.

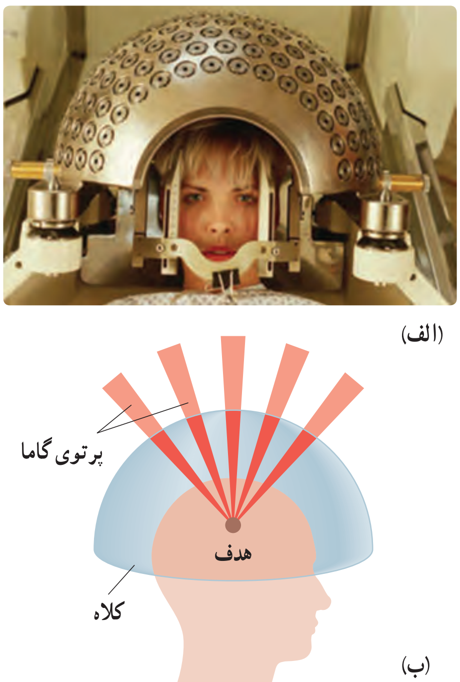


شکل ۴ـ۲۷ واپاشی γ وقتی رخ می‌دهد که هسته‌ای برانگیخته شده باشد.

خوب است بدانید

جراحی با پرتوهای گاما

جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نویدبخشی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیچ چاقویی استفاده نمی‌شود، از باریکه‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط چشمهٔ کبالت ۶۰ گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل الف نشان می‌دهد، بیمار یک کلاه ایمنی فلزی بر سر می‌گذارد که سوراخ‌های بسیار کوچکی روی آن ایجاد شده است. پرتوهای عبوری از این سوراخ ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این‌رو بافت هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کند و تخریب می‌شود، در حالی که بافت سالم مجاور آسیبی نمی‌بینند. جراحی با پرتوهای گاما، روشی بدون درد و خونریزی است که اغلب با بی‌حسی موضعی صورت می‌گیرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه‌تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می‌گردد.



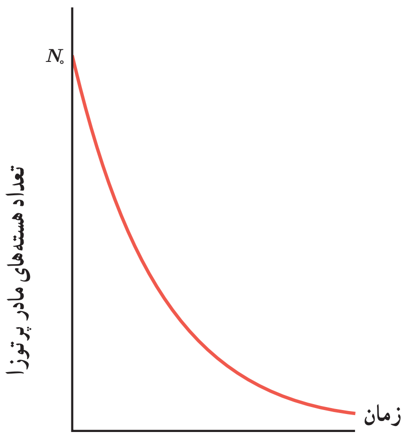
(الف) در جراحی با پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی‌ای که سوراخ‌های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می‌شود. (ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ‌ها، روی هدف تعیین‌شده در مغز، متمرکز می‌شوند.



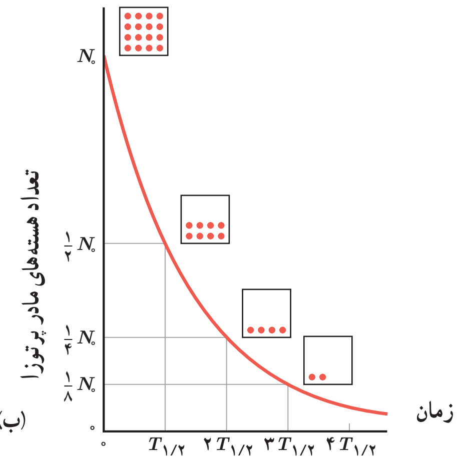
روزالیند یالو(۲۰۱۱–۱۹۲۱م). فیزیک‌دان آمریکایی، پس از دریافت دکترای فیزیک هسته‌ای، در زمینهٔ کاربرد ایزوتوپ‌های پرتوزا در پزشکی تحقیق کرد. وی روش ایمنی‌سنجی تابشی را ابداع کرد، که در آن از ردیاب‌های پرتوزا برای اندازه‌گیری مقادیر کم مواد در خون یا سایر شاره‌ها استفاده می‌شود. اهمیت این روش با اعطای جایزهٔ نوبل پزشکی در سال ۱۹۷۷ به وی بیشتر مشخص شد.

نیمه‌عمر : ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. برای یک نمونه از یک مادهٔ پرتوزا، بر اساس داده‌های تجربی می‌توان بیان کرد که در پایان زمانِ معیّنی، چه کسری از مادهٔ پرتوزا وا می‌پاشد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ۹۰ پس از زمان معیّنی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ۸۸ تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونهٔ پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظهٔ $t=0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۴ــ۲۸ الف به‌دست می‌آید. همان‌طور که روی نمودار نیز دیده می‌شود، پس از گذشت زمان کافی، تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه، به صفر میل می‌کند. برای درک بهتر این نمودار، کمیتی به نام نیمه‌عمر را معرفی می‌کنیم و آن را با نماد $T_{\frac{1}{2}}$ نشان می‌دهیم. بنا به تعریف، نیمه‌عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسند (شکل ۴ــ۲۸ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ۲۳۸، دارای نیمه‌عمری در حدود سنّ زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



(الف)



(ب)

شکل ۴ــ۲۸ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. ب) با گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده واپاشی می‌کنند.

مثال ۴ــ۵

در حادثهٔ انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، یُد ۱۳۱ ($^{131}_{53}I$)، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فرّار است و همراه با جریان‌های جوّی، تا کشورهای دوردست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی‌مانده بود؟

پاسخ : نیمه‌عمر ایزوتوپ یُد۱۳۱ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $^{131}_{53}I$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری‌شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی‌مانده	N_0	$\frac{1}{2}\times N_0=\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{8}=\frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{16}=\frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونهٔ پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \qquad \text{(تعداد هسته‌های پرتوزای باقی‌مانده)} \qquad (۴\text{ــ}۱۲)$$

که در آن n از رابطهٔ $\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ به‌دست می‌آید[1].

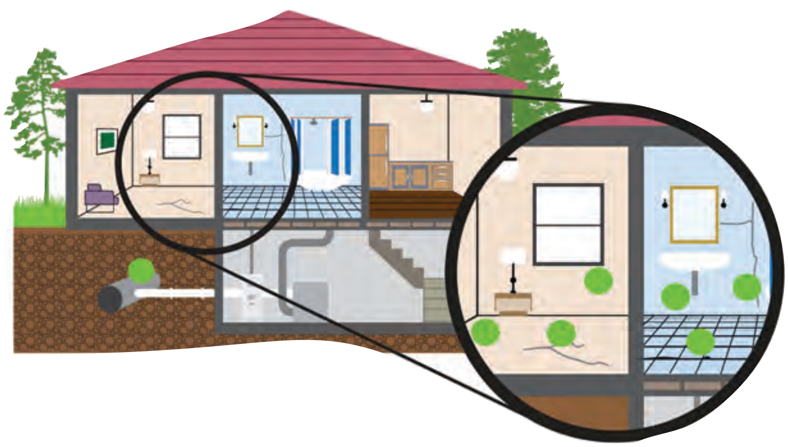
تمرین ۴ــ۷

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

خوب است بدانید

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

رادون ($^{222}_{86}Rn$)، گازی پرتوزاست که به‌طور طبیعی به‌وجود می‌آید و محصول واپاشی رادیم ($^{226}_{88}Ra$) است. رادون درون خاک به شکل گاز است و می‌تواند از محل هایی مانند شکاف‌های روی دیوارها و کفِ ساختمان، حفره‌های دور لوله‌ها، منبع آب یا لوله‌های آب وارد خانه‌ها شود (نقاط سبز رنگ روی شکل). اینکه میزان جمع شدن رادون درون خانه بتواند به‌طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر ۳/۸۳ روز، به هسته‌های دختری که آنها نیز پرتوزا هستند واپاشی می‌کند. این هسته‌های پرتوزا، می‌توانند به ذرات غبار و دود بچسبند و با تنفس وارد ریه‌ها شوند و پس از واپاشی، به بافت‌های بدن آسیب بزنند. اگر شخصی برای مدتی طولانی در معرض گاز رادون باشد، ممکن است به سرطان ریه مبتلا شود. از آنجا که میزان تجمع گاز رادون را می‌توان با دستگاه‌هایی اندازه‌گیری کرد توصیه می‌شود که خانه‌ها برای سنجش رادون مورد آزمایش قرار گیرند.



۱ــ در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها n عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

۴ــ۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱. یک لامپ حاوی گاز کم‌فشار سدیم، فوتون‌هایی با طول‌موج ۵۸۹nm گسیل می‌کند.

الف) بسامد و انرژی فوتون‌های گسیلی را حساب کنید. انرژی را برحسب ژول و همچنین الکترون ولت بیان کنید.

ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ ۵/۰W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می‌شود؟

۲. توان باریکهٔ نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون ۵/۰mW است. اگر توان ورودی این لیزر ۵۰/۰W باشد،

الف) بازده لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول‌موج باریکهٔ نور خروجی ۶۳۳nm باشد، شمار فوتون‌هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می‌شود.

۳. یک لامپ رشته‌ای با توان ۱۰۰W از فاصلهٔ یک کیلومتری دیده می‌شود. فرض کنید نور لامپ به‌طور یکنواخت در فضای اطراف آن منتشر می‌شود و بازدهٔ لامپ ۵ درصد است (یعنی ۵W تابش مرئی گسیل می‌کند) و فقط ۱ درصد این تابش دارای طول‌موجی در حدود ۵۵۰nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول‌موج وارد مردمک‌های چشم ناظری می‌شود که در این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را ۲/۰mm در نظر بگیرید.)

۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود $۱۳۶۰ W/m^2$ است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر $۱m^2$، مقدار انرژی ۱۳۶۰J می‌رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می‌رسد مقداری زیادی از شدت آن، به علت جذب در جو و ابرها از دست می‌رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به‌ازای هر متر مربع حدود $۳۰۰ W/m^2$ باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می‌رسد؟ طول‌موج متوسط فوتون‌ها را ۵۷۰nm فرض کنید.

۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟

ب) توضیح دهید نظریهٔ کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به‌صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟

۶. توضیح دهید برای یک فلز معیّن، تغییر هر یک از کمیت‌های زیر چه تأثیری در نتیجهٔ اثر فوتوالکتریک دارد.

الف) افزایش یا کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه

ب) افزایش شدت نور فرودی در بسامدهای کوچک‌تر از بسامد آستانه

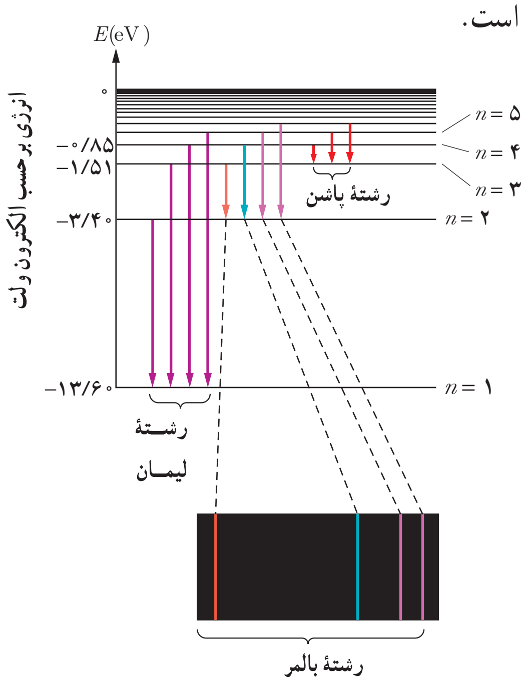
پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ‌تر از بسامد آستانه

۴ــ۲ و ۴ــ۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد ــ بور

۷. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.

ب) توضیح دهید چگونه می‌توان طیف‌های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.

۸. شکل زیر سه رشتهٔ طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می‌دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.



الف) منظور از $n = ۱$ و انرژی ‎-۱۳/۶۰eV‎ چیست؟

ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.

پ) اختلاف کوتاه‌ترین و بلندترین طول‌موج در هر رشته را، گسترهٔ طول‌موج‌های آن رشته می‌نامند. گسترهٔ طول‌موج‌های رشتهٔ لیمان $(n' = ۱)$ را پیدا کنید.

۹. الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.

ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌توانید خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

پ) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیدهٔ فیزیکی نمونه‌ای از فلوئورسانی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیدهٔ فلوئورسانی طول‌موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول‌موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

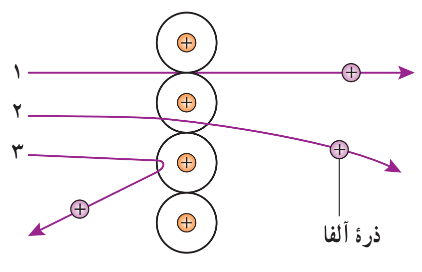
۱۰. مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقهٔ نازک طلا به‌دست آمده بود (شکل الف).

الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

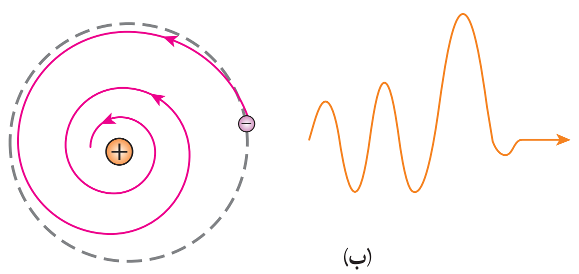
ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذرهٔ ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را دربارهٔ ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟

پ) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحهٔ بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟

ت) شکل ب، به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟



(الف)


(ب)

۱۱. با استفاده از رابطهٔ بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن،

الف) اختلاف انرژی $\Delta E(n_U \to n_L) = E_U - E_L$ را حساب کنید.

ب) نشان دهید که :

$$\Delta E(۴\to۲) = \Delta E\ (۴\to۳) + \Delta E\ (۳\to۲)$$

$$\Delta E(۴\to۱) = \Delta E\ (۴\to۲) + \Delta E\ (۲\to۱)$$

۱۲. الکترون اتم هیدروژنی در تراز $n = ۵$ قرار دارد.

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = ۱$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

۴ـ۴ لیزر

۱۳. شکل زیر فرایند ایجاد باریکهٔ لیزر را به‌طور طرح‌وار در ۴ مرحله نشان می‌دهد.

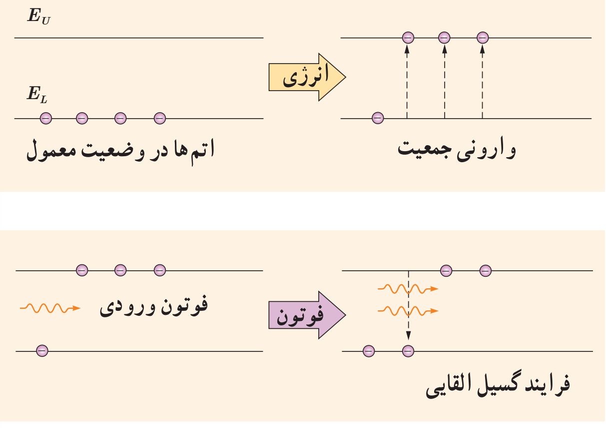
الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟

ب) نقش انرژی داده‌شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تأمین می‌شود؟

پ) منظور از «وارونی جمعیت» چیست؟

ت) انرژی فوتون ورودی چقدر باید باشد تا فرایند گسیل القایی انجام شود؟

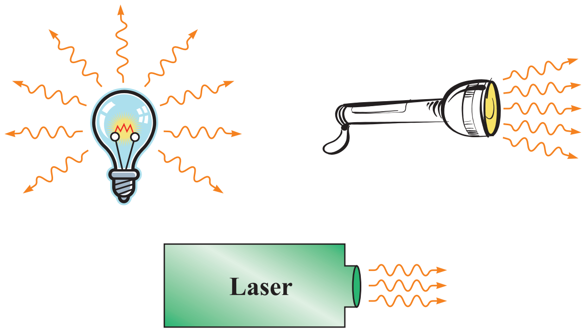
ث) فوتون‌هایی که بر اثر فرایند گسیل القایی و جهش الکترون‌ها به تراز پایین‌تر ایجاد می‌شوند چه ویژگی‌های مشترکی دارند؟



۱۴. در شکل زیر نحوهٔ گسیل فوتون‌ها از سه چشمهٔ نور شامل لامپ رشته‌ای، چراغ قوه با لامپ رشته‌ای و لیزر با یکدیگر مقایسه شده است.

الف) با توجه به آنچه در این فصل فراگرفتید تفاوت فوتون‌های گسیل‌شده از هر چشمه را با یکدیگر بیان کنید.

ب) چرا توصیهٔ جدی می‌شود که هیچ‌گاه به طور مستقیم به باریکهٔ نور ایجادشده توسط لیزر نگاه نکنید؟



۴ـ۵ ساختار هسته

۱۵. مرتبهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبهٔ بزرگی جرم این توپ چقدر است؟

(مرتبهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب $۱۰^{-۱۵}\mathrm{m}$ و $۱۰^{-۲۷}\mathrm{kg}$ در نظر بگیرید.)

۱۶. برای $^{۲۰۸}_{۸۲}\mathrm{Pb}$ مطلوب است:

الف) تعداد نوکلئون‌ها   ب) تعداد نوترون‌ها

پ) بار الکتریکی خالص هسته

۱۷. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

الف) $^{۱۹۵}_{۷۸}\mathrm{X}$ ب) $^{۳۲}_{۱۶}\mathrm{X}$ پ) $^{۶۱}_{۲۹}\mathrm{X}$

۱۸. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۵}\mathrm{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{۵۹}_{۲۵}\mathrm{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۶}\mathrm{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۴ـ۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۱۹. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α، β^+ یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

$$^{۲۱۱}_{۸۲}\mathrm{Pb} \longrightarrow {}^{۲۱۱}_{۸۳}\mathrm{Bi} + \ldots$$

$$^{۱۱}_{۶}\mathrm{C} \longrightarrow {}^{۱۱}_{۵}\mathrm{B} + \ldots$$

$$^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th}^{*} \longrightarrow {}^{۲۳۱}_{۹۰}\mathrm{Th} + \ldots$$

$$^{۱۸}_{۹}\mathrm{F} \longrightarrow {}^{۱۸}_{۸}\mathrm{O} + \ldots$$

۲۰. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.

الف) $^{۲۴۲}_{۹۴}\mathrm{Pu}$ واپاشی α انجام دهد.

ب) سدیم $^{۲۴}_{۱۱}\mathrm{Na}$ واپاشی β^- انجام دهد.

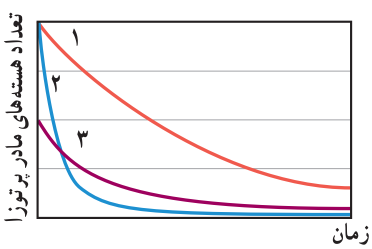
پ) نیتروژن $^{۱۳}_{۷}\mathrm{N}$ واپاشی β^- انجام دهد.

ت) $^{۱۵}_{۸}\mathrm{O}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

۲۱. سرب $^{۲۰۷}_{۸۲}\mathrm{Pb}$ هستهٔ دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ مشخص کنید.

۲۲. نپتونیم $^{۲۳۷}_{۹۳}\mathrm{Np}$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β^-، α و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

۲۳. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۲۴. هنگامی‌که نیتروژن جوّ زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جوّ می‌شود.
اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.
وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد.
کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{۱}{۶۴}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۲۵. نیمه‌عمر بیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این بیسموت، باقی می‌ماند؟

جدول دوره‌ای عناصر

۱ H هیدروژن ۱/۰۰۸

- عدد اتمی: ۱
- نماد شیمیایی عنصر: H
- نام عنصر: هیدروژن
- جرم اتمی میانگین (g/mol): ۱/۰۰۸

۱ H هیدروژن ۱٫۰۰۸																	۲ He هلیم ۴٫۰۰۳
۳ Li لیتیم ۶٫۹۴	۴ Be بریلیم ۹٫۰۱											۵ B بور ۱۰٫۸۰	۶ C کربن ۱۲٫۰۱	۷ N نیتروژن ۱۴٫۰۱	۸ O اکسیژن ۱۶٫۰۰	۹ F فلوئور ۱۹٫۰۰	۱۰ Ne نئون ۲۰٫۱۸
۱۱ Na سدیم ۲۲٫۹۹	۱۲ Mg منیزیم ۲۴٫۳۱											۱۳ Al آلومینیم ۲۶٫۹۸	۱۴ Si سیلیسیم ۲۸٫۰۹	۱۵ P فسفر ۳۰٫۹۷	۱۶ S گوگرد ۳۲٫۰۷	۱۷ Cl کلر ۳۵٫۴۵	۱۸ Ar آرگون ۳۹٫۹۵
۱۹ K پتاسیم ۳۹٫۱۰	۲۰ Ca کلسیم ۴۰٫۰۸	۲۱ Sc اسکاندیم ۴۴٫۹۶	۲۲ Ti تیتانیم ۴۷٫۸۷	۲۳ V وانادیم ۵۰٫۹۴	۲۴ Cr کروم ۵۲٫۰۰	۲۵ Mn منگنز ۵۴٫۹۴	۲۶ Fe آهن ۵۵٫۸۵	۲۷ Co کبالت ۵۸٫۹۳	۲۸ Ni نیکل ۵۸٫۶۹	۲۹ Cu مس ۶۳٫۵۵	۳۰ Zn روی ۶۵٫۳۹	۳۱ Ga گالیم ۶۹٫۷۲	۳۲ Ge ژرمانیم ۷۲٫۶۴	۳۳ As آرسنیک ۷۴٫۹۲	۳۴ Se سلنیم ۷۸٫۹۶	۳۵ Br برم ۷۹٫۹۰	۳۶ Kr کریپتون ۸۳٫۸۰
۳۷ Rb روبیدیم ۸۵٫۴۷	۳۸ Sr استرانسیم ۸۷٫۶۲	۳۹ Y ایتریم ۸۸٫۹۱	۴۰ Zr زیرکونیم ۹۱٫۲۲	۴۱ Nb نیوبیم ۹۲٫۹۱	۴۲ Mo مولیبدن ۹۵٫۹۴	۴۳ Tc تکنسیم –	۴۴ Ru روتنیم ۱۰۱٫۱	۴۵ Rh رودیم ۱۰۲٫۹۰	۴۶ Pd پالادیم ۱۰۶٫۴۰	۴۷ Ag نقره ۱۰۷٫۹۰	۴۸ Cd کادمیم ۱۱۲٫۴۰	۴۹ In ایندیم ۱۱۴٫۸۰	۵۰ Sn قلع ۱۱۸٫۷۰	۵۱ Sb آنتیموان ۱۲۱٫۸۰	۵۲ Te تلوریم ۱۲۷٫۶۰	۵۳ I ید ۱۲۶٫۹۰	۵۴ Xe زنون ۱۳۱٫۳۰
۵۵ Cs سزیم ۱۳۲٫۹	۵۶ Ba باریم ۱۳۷٫۳	۷۱ Lu لوتسیم ۱۷۵/۰۰	۷۲ Hf هافنیم ۱۷۸٫۵	۷۳ Ta تانتال ۱۸۰٫۹۰	۷۴ W تنگستن ۱۸۳٫۸۰	۷۵ Re رنیم ۱۸۶٫۲۰	۷۶ Os اسمیم ۱۹۰٫۲۰	۷۷ Ir ایریدیم ۱۹۲٫۲۰	۷۸ Pt پلاتین ۱۹۵٫۱	۷۹ Au طلا ۱۹۷٫۰۰	۸۰ Hg جیوه ۲۰۰٫۶۰	۸۱ Tl تالیم ۲۰۴٫۳۰	۸۲ Pb سرب ۲۰۷٫۲۰	۸۳ Bi بیسموت ۲۰۹٫۰۰	۸۴ Po پولونیم [۲۰۹]	۸۵ At استاتین [۲۱۰]	۸۶ Rn رادون [۲۲۲]
۸۷ Fr فرانسیم [۲۲۳]	۸۸ Ra رادیم [۲۲۶]	۱۰۳ Lr لورنسیم [۲۶۲]	۱۰۴ Rf رادرفوردیم [۲۶۷]	۱۰۵ Db دابنیم [۲۶۸]	۱۰۶ Sg سیبورگیم [۲۷۱]	۱۰۷ Bh بوریم [۲۷۲]	۱۰۸ Hs هاسیم [۲۷۷]	۱۰۹ Mt مایتنریم [۲۷۶]	۱۱۰ Ds دارمشتاتیم [۲۸۱]	۱۱۱ Rg رونتگنیم [۲۸۰]	۱۱۲ Cn کوپرنسیم [۲۷۷]	۱۱۳ Nh نیهونیم [۲۸۴]	۱۱۴ Fl فلرویم [۲۸۹]	۱۱۵ Mc مسکوویم [۲۸۸]	۱۱۶ Lv لیورموریم [۲۹۳]	۱۱۷ Ts تنسینه [۲۹۶]	۱۱۸ Og اوگانسون [۲۹۴]

۵۷ La لانتان ۱۳۸٫۹۰	۵۸ Ce سریم ۱۴۰٫۱۰	۵۹ Pr پراسئودیمیم ۱۴۰٫۹۰	۶۰ Nd نئودیمیم ۱۴۴٫۲۰	۶۱ Pm پرومتیم [۱۴۵]	۶۲ Sm ساماریم ۱۵۰٫۴۰	۶۳ Eu اوروپیم ۱۵۲٫۰۰	۶۴ Gd گادولینیم ۱۵۷٫۳۰	۶۵ Tb تربیم ۱۵۸٫۹۰	۶۶ Dy دیسپروزیم ۱۶۲٫۵۰	۶۷ Ho هولمیم ۱۶۴٫۹۰	۶۸ Er اربیم ۱۶۷٫۳۰	۶۹ Tm تولیم ۱۶۸٫۹۰	۷۰ Yb ایتربیم ۱۷۳٫۰۰
۸۹ Ac اکتینیم [۲۲۷]	۹۰ Th توریم ۲۳۲٫۰۰	۹۱ Pa پروتاکتینیم ۲۳۱٫۰۰	۹۲ U اورانیم ۲۳۸٫۰۰	۹۳ Np نپتونیم [۲۳۷]	۹۴ Pu پلوتونیم [۲۴۴]	۹۵ Am امریسیم [۲۴۳]	۹۶ Cm کوریم [۲۴۷]	۹۷ Bk برکلیم [۲۴۷]	۹۸ Cf کالیفرنیم [۲۵۱]	۹۹ Es اینشتینیم [۲۵۲]	۱۰۰ Fm فرمیم [۲۵۷]	۱۰۱ Md مندلیم [۲۵۸]	۱۰۲ No نوبلیم [۲۵۹]

جدول مثلثاتی

زاویه بر حسب درجه	زاویه بر حسب رادیان	سینوس	کسینوس	تانژانت	زاویه بر حسب درجه	زاویه بر حسب رادیان	سینوس	کسینوس	تانژانت
0°	0.000	0.000	1.000	0.000					
1°	0.017	0.017	1.000	0.017	46°	0.803	0.719	0.695	1.036
2°	0.035	0.035	0.999	0.035	47°	0.820	0.731	0.682	1.072
3°	0.052	0.052	0.999	0.052	48°	0.838	0.743	0.669	1.111
4°	0.070	0.070	0.998	0.070	49°	0.855	0.755	0.656	1.150
5°	0.087	0.087	0.996	0.087	50°	0.873	0.766	0.643	1.192
6°	0.105	0.105	0.995	0.105	51°	0.890	0.777	0.629	1.235
7°	0.122	0.122	0.993	0.123	52°	0.908	0.788	0.616	1.280
8°	0.140	0.139	0.990	0.141	53°	0.925	0.799	0.602	1.327
9°	0.157	0.156	0.988	0.158	54°	0.942	0.809	0.588	1.376
10°	0.175	0.174	0.985	0.176	55°	0.960	0.819	0.574	1.428
11°	0.192	0.191	0.982	0.194	56°	0.977	0.829	0.559	1.483
12°	0.209	0.208	0.978	0.213	57°	0.995	0.839	0.545	1.540
13°	0.227	0.225	0.974	0.231	58°	1.012	0.848	0.530	1.600
14°	0.244	0.242	0.970	0.249	59°	1.030	0.857	0.515	1.664
15°	0.262	0.259	0.966	0.268	60°	1.047	0.866	0.500	1.732
16°	0.279	0.276	0.961	0.287	61°	1.065	0.875	0.485	1.804
17°	0.297	0.292	0.956	0.306	62°	1.082	0.883	0.469	1.881
18°	0.314	0.309	0.951	0.325	63°	1.100	0.891	0.454	1.963
19°	0.332	0.326	0.946	0.344	64°	1.117	0.899	0.438	2.050
20°	0.349	0.342	0.940	0.364	65°	1.134	0.906	0.423	2.145
21°	0.367	0.358	0.934	0.384	66°	1.152	0.914	0.407	2.246
22°	0.384	0.375	0.927	0.404	67°	1.169	0.921	0.391	2.356
23°	0.401	0.391	0.921	0.424	68°	1.187	0.927	0.375	2.475
24°	0.419	0.407	0.914	0.445	69°	1.204	0.934	0.358	2.605
25°	0.436	0.423	0.906	0.466	70°	1.222	0.940	0.342	2.747
26°	0.454	0.438	0.899	0.488	71°	1.239	0.946	0.326	2.904
27°	0.471	0.454	0.891	0.510	72°	1.257	0.951	0.309	3.078
28°	0.489	0.469	0.883	0.532	73°	1.274	0.956	0.292	3.271
29°	0.506	0.485	0.875	0.554	74°	1.292	0.961	0.276	3.487
30°	0.524	0.500	0.866	0.577	75°	1.309	0.966	0.259	3.732
31°	0.541	0.515	0.857	0.601	76°	1.326	0.970	0.242	4.011
32°	0.559	0.530	0.848	0.625	77°	1.344	0.974	0.225	4.331
33°	0.576	0.545	0.839	0.649	78°	1.361	0.978	0.208	4.705
34°	0.593	0.559	0.829	0.675	79°	1.379	0.982	0.191	5.145
35°	0.611	0.574	0.819	0.700	80°	1.396	0.985	0.174	5.671
36°	0.628	0.588	0.809	0.727	81°	1.414	0.988	0.156	6.314
37°	0.646	0.602	0.799	0.754	82°	1.431	0.990	0.139	7.115
38°	0.663	0.616	0.788	0.781	83°	1.449	0.993	0.122	8.144
39°	0.681	0.629	0.777	0.810	84°	1.466	0.995	0.105	9.514
40°	0.698	0.643	0.766	0.839	85°	1.484	0.996	0.087	11.43
41°	0.716	0.656	0.755	0.869	86°	1.501	0.998	0.070	14.301
42°	0.733	0.669	0.743	0.900	87°	1.518	0.999	0.052	19.081
43°	0.750	0.682	0.731	0.933	88°	1.536	0.999	0.035	28.636
44°	0.768	0.695	0.719	0.966	89°	1.553	1.000	0.017	57.290
45°	0.785	0.707	0.707	1.000	90°	1.571	1.000	0.000	∞

واژه‌نامهٔ فارسی ـ انگلیسی

الف

آستانهٔ دردناکی	Threshold of pain
آستانهٔ شنوایی	Threshold of hearing
آشفتگی	Disturbance
آشکارسازی	Detection
آونگ	Pendulum
آونگ ساده	Simple pendulum
آینهٔ تخت	Plane mirror
اثر دوپلر	Doppler effect
اثر فوتوالکتریک	Photoelectric effect
اجاق میکروموج	Microwave oven
ارتعاش	Vibration
ارتفاع صوت	Pitch
اصطکاک	Friction
اصل برهم‌نهی	Superposition principle
امواج الکترومغناطیسی	Electromagnetic waves
انتشار	Propagation
انتقال به آبی	Blue shift
انتقال به سرخ	Red shift
انرژی آزادشده	Released energy
انرژی بستگی	Binding energy
انرژی پتانسیل	Potential energy
انرژی پتانسیل کشسانی	Elastic potential energy
انرژی پتانسیل گرانشی	Gravitational potential energy
انرژی جنبشی	Kinetic energy
ایزوتوپ (هم‌مکان)	Isotope

ب

بازتاب	Reflection
بازتاب آینه‌ای (منظم)	Specular reflection
بازتاب پخشنده (نامنظم)	Diffuse reflection
بازتاب داخلی کلی	Total internal reflection
برانگیختگی	Excitation
بردار برایند	Resultant vector
بردار مکان	Position vector
برهم‌کنش	Interaction
بسامد (فرکانس)	Frequency
بسامد آستانه	Threshold frequency
بسامد تشدیدی	Resonance frequency
بسامد زاویه‌ای	Angular frequency
بسامدهای فوق پایین (ELF)	Extremely low frequency
بلندگو	Loudspeaker
بلندی صوت	Loudness

پ

پاستیغ موج	Trough
پاشندگی رنگی	Collor dispersion
پایدار	Stable
پایداری اتم	Atom stability
پرتوزایی	Radioactivity
پرتوی شکسته	Refracted ray
پرتوی فرودی (تابیده)	Incident ray
پرتوی گاما	Gamma ray
پژواک	Echo

ت

تابش گرمایی	Thermal radiation
تابع سینوسی	Sinusoidal function
تار نوری	Fiber optic
تبدیل جرم ـ انرژی	Mass – energy conversion
تپ	Pulse
تراز انرژی	Energy level
تراز شدت صوت (تراز صوتی)	Intensity level
تشت موج	Ripple tank
تشدید	Resonance
تکانه	Momentom

تکفام	Monochromatic
تندی	Speed
تندی انتشار	Speed of propagation
تندی حدی	Terminal speed
تندی لحظه‌ای	Instantaneous speed
تندی متوسط	Average speed

ث

ثابت پلانک	Planck constant
ثابت ریدبرگ	Rydberg constant
ثابت فنر	Spring constant

ج

جابه‌جایی	Displacement
جبهۀ موج	Wavefront
جرم اتمی	Atomic mass
جهت	Direction

چ

چشمه	Source
چگالی خطی جرم	Linear mass density

ح

حرکت با شتاب ثابت	Motion with constant acceleration
حرکت بر خط راست	Motion along a straight line
حرکت تندشونده	Accelerating motion
حرکت دوره‌ای	Periodic motion
حرکت کندشونده	Decelerating motion
حرکت هماهنگ ساده	Simple Harmonic Motion
حرکت یکنواخت	Uniform motion

خ

خطّ عمود	Normal

د

دامنه	Amplitude
درّه موج	Valley
دورۀ تناوب	Period
دیاپازون	Tuning fork
دینامیک	Dynamics

ذ

ذرۀ بتا	Beta particle

ر

رشتۀ خطوط	Series of lines
رشتۀ لیمان	Lyman series

س

ستیغ موج	Crest
سراب (سراب آبگیر)	Oasis mirage
سرعت	Velocity
سرعت اولیه	Initial velocity
سرعت لحظه‌ای	Instantaneous velocity
سرعت متوسط	Average velocity

ش

شبه پایدار	Metastable
شتاب	Acceleration
شتاب گرانشی	Gravity acceleration
شتاب لحظه‌ای	Instantaneous acceleration
شتاب متوسط	Average acceleration
شدت	Intensity
شکست	Refraction
شکم موج	Antinode
شیب خط	Slope

ص

صوت	Sound

ض

ضریب اصطکاک ایستایی	Coefficient of static friction
ضریب اصطکاک جنبشی	Coefficient of kinetic friction
ضریب شکست	Refraction index

ط

طول موج	Wavelength
طیف	Spectrum
طیف اتمی	Atomic spectrum
طیف جذبی	Absorption spectrum
طیف خطی	Line spectrum
طیف گسیلی (نشری)	Emission spectrum
طیف‌نما	Spectroscope
طیف نمایی	Spectroscopy

ع

عبور	Transmission
عدد اتمی	Atomic number
عدد کوانتومی	Quantum number
عکس (تصویر) لحظه‌ای	Snapshot

ف

فرابنفش	Ultraviolet
فراصوت	Ultrasound
فروسرخ	Infrared
فروصوت	Subsonic
فنر	Spring
فیزیک اتمی	Atomic physics
فیزیک هسته‌ای	Nuclear physics

ق

قانون اسنل	Snell’s Law
قانون بازتاب عمومی	General law of reflection
قانون شکست عمومی	General law of refraction
قطار موج	Wave train
قلّه موج	Peak
قوانین نیوتون	Newton’s laws

ک

کاستی جرم	Mass defect
کانون (نقطهٔ کانونی)	Focal point
کانونی‌شدن (کردن)	Focus

گ

گذار	Transition
گرهٔ موج	Node
گسیل	Emission
گسیل القایی	Stimulated emission
گسیل خودبه‌خود	Spontaneous emission

ل

لَختی	Inertia

م

ماهواره	Satellite
محیط	Medium
مُد اصلی	Fundamental mode
مدل اتم هسته‌ای	Nuclear atom model
مدل بور	The Bohr model
مدل تامسون	The Thomson model
مدل رادرفورد	The Rutherford model
معادله‌های ماکسول	Maxwell equations
مقاومت هوا	Air resistance

مکان‌یابی پژواکی	Echolocation
منطقهٔ ردشوندگی	Skip zone
موج ایستاده	Standing wave
موج پیشرونده	Travelling wave
موج تخت	Plane wave
موج سینوسی	Sinusoidal wave
موج صوتی	Sound wave
موج طولی	Longitudinal wave
موج عرضی	Transverse wave
موج کروی	Spherical wave
موج لرزه‌ای	Seismic wave
موج مکانیکی	Mechanical wave
میله‌های کنترل	Controls road

ن

ناپیوسته	Discrete
ناحیهٔ پوشش زمینی موج	Ground wave coverage
ناحیهٔ پوشش هوایی موج	Sky wave coverage
ناظر	Observer
ناهمفاز	Out of Phase
نسبیت	Relativity
نقش موج	Wave pattern
نقطهٔ بازگشتی	Turning point
نمودار تراز انرژی	Energy level diagram
نوترینو	Neutrino
نور مرئی	Visible light
نوسان	Oscillation
نوسان دوره‌ای	Periodic oscillation
نوسان‌ساز	Vibration generator
نوسانگر	Oscillator
نوسان میرا	Damped oscillation
نوسان‌نگار	Oscillograph
نوسان‌نگاشت	Oscillogram
نوسان واداشته	Driven oscillation
نوکلئون	Nucleon
نیرو	Force
نیروی اصطکاک	Friction force
نیروی خالص	Net force
نیروی عمودی سطح	Normal force
نیروی کشسانی	Elastic force
نیروی کشش طناب	String force
نیروی گرانشی	Gravitational force
نیروی مقاومت شاره (پس‌کشی)	Drag force
نیروی هسته‌ای	Nuclear force
نیمه عمر	Half life

و

واپاشی	Decay
وارونی جمعیت	Population inversion
واکنش	Reaction
واکنش زنجیری	Chain reaction
وزن	Weight
وضع تعادل	Equilibrium state
ولتاژ بالا	High voltage

هـ

هسته	Nucleus
هستهٔ پایدار	Stable nucleus
هستهٔ ناپایدار	Unstable nucleus
هماهنگ	Harmonic
همفاز	In – Phase
همگن	Homogeneous

منابع

منابع انگلیسی

1. McGraw – Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms, Sybil p. Parker, 4th edition, 1989, Mc Graw – Hill.

2. Physics, James S. Walker, 5th Edition, 2017, Pearson.

3. University Physics, Bauer and Westfall, 2011, McGraw – Hill.

4. Physics, Douglas C. Giancoli, 7th Edition, 2014, Prentice – Hall International.

5. Physics, Allen Giambattista , Betty Richardson and Robert Richardson, 2th Edition, 2008, McGraw– Hill.

6. Physics for Scientists and Engineers, Randall D. Knight, 3th Edition, 2013, Pearson.

7. Cambridge International AS and A Level Physics, Mike Crundell, 2th Edition, 2014, Hodder Education.

8. University Physics, Sears & Zemansky and Hugh D.Young, 14th edition 2016, Addison–Wesley.

9. Introduction to Physics, John D. Cutnell and Kenneth W. Johnson, 10th Edition, 2016, John Wiley & Sons, Inc.

10. College Physics, Eugenia Etkina, 2014 Pearson

11. Oxford Physics IB Diploma, David Homer and Michael Bowen – Jones, 2014, Oxford University Press.

12. Pearson IB Diploma, Chris Hamper, 2009,Pearson.

13. IB Physics, Gregg Kerr and Paul Ruth, 3th edition, 2007, IBID Press.

14. College Physics, Hugh D. Young, 9th edition, 2012, Addreson – Wesly.

15. College Physics, Raymond Serway and Chris Vuille, 9th edition, 2012, Cengage Learning

16. Physics, David Young and Shane Stadler , 10th edition , 2015 , Johnwiley.

17. Inquiry into Physics, Vern J.Ostdiec and Donald J.Bord, 8th edition, 2018, Cengage Learning.

18. College Physics, Nicholas J. Giardono, 2010, Cengage Learning.

19. Physics, Eugen Hecht, 2th edition, 1998, Brooks

منابع فارسی

۱ــ فیزیک دانشگاهی (جلد اول)، ویراست دوازدهم، سیرز، زیمانسکی، یانگ و فریدمن، ترجمه اعظم پورقاضی، روح‌اله خلیلی بروجنی، محمدتقی فلاحی مروستی، چاپ اول ۱۳۸۹، مؤسسهٔ نشر علوم نوین.

۲ــ مبانی فیزیک، جلدهای اول تا سوم ویراست دهم، دیوید هالیدی، رابرت رزنیک و یرل واکر، ترجمه محمد رضا خوش بین خوش‌نظر، چاپ ۱۳۹۶، انتشارات نیاز دانش.

۳ــ دوره درسی فیزیک (جلد سوم) زیر نظر : گ س. لند سبرگ، ترجمهٔ لطیف کاشیگر و همکاران، انتشارات فاطمی ۱۳۷۶.

۴ــ آشنایی با فیزیک هسته‌ای کنت . کرین، ترجمهٔ منیژه رهبر و بهرام معلمی، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۶.

۵ــ نمایش هیجان‌انگیز فیزیک، ویراست دوم، یرل واکر، ترجمه محمدرضا خوش‌بین خوش‌نظر و رسول جعفری نژاد، چاپ اول۱۳۹۱، انتشارات آراکس.

۶ــ مجموعه سه جلدی دانشنامه فیزیک، جان ریگدن و دیگران، ویراسته محمد ابراهیم ابوکاظمی، ۱۳۸۷ــ۱۳۸۱، مرکز تحصیلات تکمیلی زنجان و بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی.

۷ــ مجموعهٔ ۵ جلدی فیزیک جدید، جان کاتنل و کنت جانسون، ترجمهٔ روح‌اله خلیلی بروجنی و ناصر مقبلی، انتشارات مدرسه ۱۳۹۶ــ۱۳۹۳.

۸ــ مبانی فیزیک ریموند سروی، جلدهای اول و دوم،ترجمه منیژه رهبر ـ انتشارات فاطمی ۱۳۹۴.

سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی جهت ایفای نقش خطیر خود در اجرای سند تحول بنیادین در آموزش و پرورش و برنامه درسی ملی جمهوری اسلامی ایران، مشارکت معلمان را به‌عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه‌اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان دربارهٔ کتاب‌های درسی نونگاشت، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش‌آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانهٔ راهبری دروس و مدیریت محترم پروژه آقای محسن باهو نقش سازنده‌ای را بر عهده داشتند. ضمن ارج نهادن به تلاش تمامی این همکاران، اسامی دبیران و هنرآموزانی که تلاش مضاعفی را در این زمینه داشته و با ارائهٔ نظرات خود سازمان را در بهبود محتوای این کتاب یاری کرده‌اند به شرح زیر اعلام می‌شود.

اسامی دبیران و هنرآموزان شرکت‌کننده در اعتبارسنجی کتاب فیزیک ۳ــ رشتهٔ علوم تجربی کد ۱۱۲۲۴۴

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	علیرضا کاشفی	البرز	۲۹	حیدر شکری	شهرستان‌های تهران
۲	بهاره فخرایی	کردستان	۳۰	اسدالله رفیعی	آذربایجان شرقی
۳	رضا عابدی‌منش	شهر تهران	۳۱	نفیسه عیسی‌لو	آذربایجان غربی
۴	حسین هادوی	یزد	۳۲	سیده فاطمه کمالی کارسالاری	مازندران
۵	سید ایمان بنی‌هاشم	خراسان رضوی	۳۳	مرضیه رستمی	هرمزگان
۶	ناهید دلپیشه	ایلام	۳۴	مرضیه مختاریان	سمنان
۷	فاطمه قلی‌زاده	خراسان جنوبی	۳۵	حشمت کاکا	ایلام
۸	مهدی شیروانی	خراسان شمالی	۳۶	محمدرضا ناصری	سمنان
۹	غفار الفتی	کرمانشاه	۳۷	رحیم بخشنده	اردبیل
۱۰	جلال صبری	خراسان رضوی	۳۸	فاطمه سادات کریمی دیوکلایی	قم
۱۱	فریبا جهانگیری	آذربایجان غربی	۳۹	رضا ملکی	قزوین
۱۲	فتحاله دویرانی	زنجان	۴۰	توحید گنج	اردبیل
۱۳	هدیه منوچهری	شهر تهران	۴۱	قاسم خسروبیگی	مرکزی
۱۴	مصطفی خسروی	فارس	۴۲	مجید راسخ	گیلان
۱۵	اشرف رفیعی	اصفهان	۴۳	حمیده هزاره مقدم	سیستان‌وبلوچستان
۱۶	غیاض سلیمانی	خوزستان	۴۴	محمدعلی سبک‌بار	خوزستان
۱۷	علی انصاری اصل	البرز	۴۵	عمید عقیلی‌نژاد	گلستان
۱۸	مولود رضایی بی‌غم	همدان	۴۶	رحمان لایق‌نژاد	کهگیلویه و بویراحمد
۱۹	مجید توکلی دستجردی	اصفهان	۴۷	محمد عبدالمالکی	همدان
۲۰	محمدرضا رسولی	خراسان جنوبی	۴۸	امیر علیخانی	البرز
۲۱	عبداله درویشی نخل ابراهیمی	هرمزگان	۴۹	طیبه شفیعی	بوشهر
۲۲	رقیه مؤمنی طارمسری	گیلان	۵۰	زریر زمانی	کهگیلویه و بویراحمد
۲۳	اشرف کارخانه	مرکزی	۵۱	فرشته کریمی گفتار	کرمان
۲۴	محمدرضا خاکپور	قزوین	۵۲	محمدرضا عباسی	کرمانشاه
۲۵	طاهره پوردهقان	شهرستان‌های تهران	۵۳	خشایار بازیاری	بوشهر
۲۶	مدیحه نامور	خراسان شمالی	۵۴	احمد کمالیان‌فر	فارس
۲۷	محبوبه آیت‌اللهی	یزد	۵۵	ابوالفضل دین‌محمدی	زنجان
۲۸	جهانگیر بهمنی	کردستان			